

Thomas Hanke
Ole Soukup
Peter Viebahn
Manfred Fishedick (AP-Leitung)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Bottom-up Wirkungsanalyse-Modell

Abschlussbericht zu AS6.2

Abschlussbericht des Arbeitsschritts 6.2 des Projekts
„Material-effizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Dr. Peter Viebahn

Tel.: +49 (0) 202 2492 -306, Fax: -198

Mail: peter.viebahn@wupperinst.org

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org

peter.hennicke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

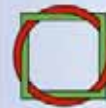
Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)

finden Sie unter www.ressourcen.wupperinst.org

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

**Wuppertal Institut
in Kooperation mit**

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt**
Für Mensch und Umwelt

Bottom-up Wirkungsanalyse-Modell

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 11 |
| 1 Modellkonzept | 13 |
| 1.1 Ziele und Aufgabenstellung | 13 |
| 1.2 Das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ als Teil des Bedarfsfelds „Bauen und Wohnen“ | 14 |
| 1.3 Das Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“ | 16 |
| 2 Implementierung des Technologiemo­dells (Modul 1) | 20 |
| 2.1 Einsatz von wohnungs- und siedlungspolitischen Instrumenten | 20 |
| 2.2 Der <i>HEAT</i> -Buildings Modellrahmen | 20 |
| 2.3 Die <i>HEAT</i> -„Philosophie“ | 22 |
| 2.4 Der Einsatz von <i>HEAT</i> in MaRess | 24 |
| 3 Implementierung des Stoffstrommodells (Modul 2) | 26 |
| 3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen | 26 |
| 3.2 Sachbilanz | 29 |
| 3.3 Wirkungsabschätzung | 33 |
| 3.4 Auswertung | 38 |
| 3.5 Kopplung von Umberto mit <i>HEAT</i> und exogenen Parameter-Tabellen | 38 |
| 4 Definition der MaRess-Szenarien (Modul 3) | 41 |
| 4.1 Ausgangspunkt Policymix | 41 |
| 4.2 Narrative Beschreibung der MaRess-Szenarien | 45 |
| 5 Einflussparameter des Modells (Modul 4) | 49 |
| 5.1 Externe Parameter (szenarioübergreifende Eckdaten) | 49 |
| 5.2 Energetische Parameter | 52 |
| 5.2.1 Strommix | 52 |
| 5.2.2 Wärmemix | 56 |
| 5.2.3 Brennstoffausnutzung fossiler Kraftwerke | 58 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.3 | Gebäudeparameter (Szenarienannahmen in <i>HEAT</i>) | 59 |
| 5.4 | Produktvarianten (Variation von Produktionsvorketten) | 62 |
| 5.4.1 | Direkter Stromverbrauch von Heizungen und Dämmstoffherstellung | 62 |
| 5.4.2 | Treibmittel der Dämmstoffherstellung | 62 |
| 5.4.3 | Variation des Dämmstoffes | 64 |
| 6 | Detaillierung der Szenarien-Eingriffe auf der Nachfrageseite und deren Treibergrößen in <i>HEAT</i> | 65 |
| 7 | Modellierungsergebnisse | 69 |
| 7.1 | Material- und Energieflüsse im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ | 69 |
| 7.1.1 | Darstellung der einzelnen Szenarien | 69 |
| 7.1.2 | Szenarienvergleich | 81 |
| 7.1.3 | Variation der Dämmstoffe (XPS versus Zellulose) | 85 |
| 7.2 | Ökobilanz-Ergebnisse | 85 |
| 7.3 | Trade-off Analyse der Materialintensität mittels MIPS am Beispiel der Dämmstoffe XPS und Zellulose | 99 |
| 8 | Schlussfolgerungen, Politikempfehlungen und Forschungsbedarf | 105 |
| 8.1 | Schlussfolgerungen und Politikempfehlungen | 105 |
| 8.2 | Forschungsbedarf | 107 |
| 9 | Literatur | 111 |
| 10 | Anhang | 114 |

Abbildungen

| | | |
|-----------|--|----|
| Abb. 1-1: | Anteile der Bedarfsfelder am Globalen Materialaufwand [in 1.000 t TMR] - induzierter direkter und indirekter TMR durch die inländische Produktion für die privaten Haushalte Deutschlands im Jahr 2000 | 15 |
| Abb. 1-2: | Beispiel eines Primär-, End- und Nutzenergieflussbildes für die alten Bundesländer im Jahr 1990 | 15 |
| Abb. 1-3: | Modellkonzept für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ | 18 |
| Abb. 2-1: | Der deutsche Gebäudebestand im Jahr 2006 | 21 |
| Abb. 2-2: | Potenzialpyramide | 22 |
| Abb. 2-3: | Angebotskurve der Einsparung im Gebäudebestand (am Beispiel von Nordrhein-Westfalen) | 24 |
| Abb. 2-4: | Erreichbarkeit von Politikinstrumenten auf verschiedenen Ebenen des Bottom-up Wirkungsanalyse-Modells | 25 |
| Abb. 3-1: | Rahmen einer Ökobilanz nach ISO 14044/14044 | 26 |
| Abb. 3-2: | Hauptnetz des Stoffstrommodells und periodenabhängige Inputs von Referenzflüssen und Parametern | 28 |
| Abb. 3-3: | Result- und Unit-Prozesse in ecoinvent | 31 |
| Abb. 3-4: | Schematische Darstellung der Kopplung des Stoffstrommodells mit HEAT und exogenen Parametern | 40 |
| Abb. 5-1: | Entwicklung der Wohnflächenanteile von Alt- und Neubauten | 52 |
| Abb. 5-2: | Strommix im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 53 |
| Abb. 5-3: | Strommix im Szenario <i>MaRess Leit-Minus</i> | 54 |
| Abb. 5-4: | Strommix in den Szenarien <i>MaRess Leit</i> und <i>MaRess Leit-Plus</i> | 55 |
| Abb. 5-5: | Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 57 |
| Abb. 5-6: | Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario <i>MaRess Leit-Minus</i> | 57 |
| Abb. 5-7: | Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 58 |
| Abb. 5-8: | Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 58 |
| Abb. 7-1: | Vergleich der Endenergienachfrage in den MaRess-Szenarien <i>BAU</i> , <i>Leit-Minus</i> , <i>Leit</i> und <i>Leit-Plus</i> für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2050 | 83 |

| | | |
|------------|--|----|
| Abb. 7-2: | Vergleich der Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in den MaRess-Szenarien <i>BAU</i> , <i>Leit-Minus</i> , <i>Leit</i> und <i>Leit-Plus</i> für die Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2050 | 84 |
| Abb. 7-3: | Kumulierter Einsatz von Dämmstoffen (XPS und Zellulose) in den MaRess- Szenarien <i>MaRess BAU</i> , <i>MaRess Leit-Minus</i> , <i>MaRess Leit</i> und <i>MaRess Leit-Plus</i> | 85 |
| Abb. 7-4: | Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 87 |
| Abb. 7-5: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 88 |
| Abb. 7-6: | Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Minus</i> | 89 |
| Abb. 7-7: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Landverbrauch“ im Szenario <i>MaRess Leit-Minus</i> | 90 |
| Abb. 7-8: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario <i>MaRess Leit-Minus</i> | 90 |
| Abb. 7-9: | Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 91 |
| Abb. 7-10: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Stratosphärischer Ozonabbau“ im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 92 |
| Abb. 7-11: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 92 |
| Abb. 7-12: | Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 93 |
| Abb. 7-13: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 94 |
| Abb. 7-14: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 94 |
| Abb. 7-15: | Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Plus (Sensitivität Treibmittel)</i> – Werte zwischen 250 und 500% abgeschnitten | 95 |
| Abb. 7-16: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Stratosphärischer Ozonabbau“ im Szenario <i>MaRess Leit-Plus (Sensitivität Treibmittel)</i> | 96 |
| Abb. 7-17: | Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario <i>MaRess Leit-Plus (Sensitivität Treibmittel)</i> | 97 |
| Abb. 7-18: | Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Plus (Sensitivität Zellulose-Dämmung)</i> | 97 |

- Abb. 7-19: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario
MaRess Leit-Plus (Sensitivität Zellulose-Dämmung) _____ 98
- Abb. 7-20: Ergebnisse der Trade-off Analyse (Ressourceneinsatz versus
Einsparungen) der Dämmstoffvarianten XPS und Zellulose _____ 103

Tabellen

| | | |
|-----------|---|----|
| Tab. 3-1: | Referenzflüsse im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 29 |
| Tab. 3-2: | Produkte und Technologien in <i>HEAT</i> und ihre Äquivalenzprozesse im Stoffstrommodell | 30 |
| Tab. 3-3: | Kraftwerkstypen in der <i>Leitstudie 2008</i> und ihre Äquivalenzprozesse im Stoffstrommodell | 33 |
| Tab. 3-4: | Erläuterung der Nomenklatur von elementaren Ressourcenströmen in ecoinvent | 38 |
| Tab. 4-1: | Instrumente aus AP3 und ihre Relevanz für AS6.2 | 42 |
| Tab. 4-2: | Instrumentenbündel aus AP4 und ihre Relevanz für AS6.2 | 42 |
| Tab. 4-3: | Instrumente aus AP12 und ihre Relevanz für AS6.2 | 44 |
| Tab. 4-4: | Übersicht über die MaRess-Szenarien und ihre Annahmen zur Energieversorgung | 47 |
| Tab. 5-1: | U-Werte zur Einhaltung von Wärmeschutzverordnungen und -standards | 50 |
| Tab. 5-2: | Entwicklung der Bevölkerung Deutschlands bis 2050 | 50 |
| Tab. 5-3: | Entwicklungen der Wohnflächen pro Person | 51 |
| Tab. 5-4: | Entwicklung der Wohnungsbestände | 51 |
| Tab. 5-5: | Durchschnittliche Brennstoffausnutzung im jeweiligen Bestand fossiler Kondensationskraftwerke | 59 |
| Tab. 5-6: | Mix aus erneuerbaren Energien zur Deckung des Raumwärmebedarfes im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> (mit entsprechenden Potenzialen aus dem Szenario <i>MaRess Leit</i>) | 60 |
| Tab. 5-7: | Entwicklung der Umsetzungsraten bei der Sanierung in den MaRess-Szenarien <i>BAU</i> , <i>Leit-Minus</i> , <i>Leit</i> und <i>Leit-Plus</i> bezogen auf jährlich sanierte Wohnflächen | 62 |
| Tab. 5-8: | Treibmittelmix der Dämmstoffproduktion (XPS) in den Szenarien | 63 |
| Tab. 6-1: | Leitindikatoren im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 65 |
| Tab. 6-2: | Leitindikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Minus</i> | 66 |
| Tab. 6-3: | Leitindikatoren im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 66 |
| Tab. 6-4: | Leitindikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 67 |
| Tab. 6-5: | Zusammenfassende Darstellung der Einflussgrößen im Gebäudebereich nach Szenarien | 68 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Tab. 7-1: | Entwicklung von Nutz- und Endenergie im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 70 |
| Tab. 7-2: | Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario <i>MaRess BAU</i> [in CO ₂ -Äquivalenten] | 71 |
| Tab. 7-3: | Entwicklung der Sanierungskosten im Szenario <i>MaRess BAU</i> | 71 |
| Tab. 7-4: | Ergebnisse der Materialbilanzierung für das Szenario <i>MaRess BAU</i> für XPS | 72 |
| Tab. 7-5: | Entwicklung von Nutz- und Endenergie im Szenario <i>MaRess Leit-</i> <i>Minus</i> | 73 |
| Tab. 7-6: | Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario <i>MaRess Leit-</i> <i>Minus</i> [in CO ₂ -Äquivalenten] | 74 |
| Tab. 7-7: | Entwicklung der wirtschaftlichen Kennzahlen im Szenario <i>MaRess</i> <i>Leit-Minus</i> | 75 |
| Tab. 7-8: | Ergebnisse der Materialbilanzierung für das Szenario <i>MaRess Leit-</i> <i>Minus</i> | 75 |
| Tab. 7-9: | Entwicklung von Nutz- und Endenergie im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 76 |
| Tab. 7-10: | Entwicklung der erneuerbaren Energien-Potenziale im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 77 |
| Tab. 7-11: | Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario <i>MaRess Leit</i> [in CO ₂ -Äquivalenten] | 77 |
| Tab. 7-12: | Entwicklung der wirtschaftlichen Kenngrößen im Szenario <i>MaRess</i> <i>Leit</i> | 78 |
| Tab. 7-13: | Ergebnisse der Materialbilanzierung im Szenario <i>MaRess Leit</i> | 79 |
| Tab. 7-14: | Entwicklung von Nutz- und Endenergie in der Variantenrechnung des Szenarios <i>MaRess Leit-Plus</i> | 80 |
| Tab. 7-15: | Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario <i>MaRess Leit-</i> <i>Plus</i> [in CO ₂ -Äquivalenten] | 80 |
| Tab. 7-16: | Ergebnisse der Materialbilanzierung im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 81 |
| Tab. 7-17: | MIPS-Verrechnungsfaktoren von XPS und Zellulose sowie anderer Bau- und Dämmstoffe | 99 |
| Tab. 7-18: | Ergebnisse der MIPS-Berechnung und Trade-off Analyse für den Dämmstoff XPS im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 101 |
| Tab. 7-19: | Ergebnisse der MIPS-Berechnung und Trade-off Analyse für den Dämmstoff Zellulose im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> | 102 |

Vorwort

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse des Arbeitsschritts 6.2. Der Abschlussbericht des gesamten Arbeitspakets 6 wird als Ressourceneffizienzpaper 6.7 veröffentlicht.

Innerhalb des AS6.2 wurde am Beispiel des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“ als Teil des Bedarfsfeldes „Bauen und Wohnen“ beispielhaft analysiert, wie sich Politikansätze zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Summe auf die Ressourcenbilanz auswirken und mit welchem Erfolg sie umgesetzt werden könnten. Zu diesem Zweck wurde das Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“ entwickelt. Es koppelt erstmals ein Technologiemodell (zur Abbildung von Energieflüssen im Wohnungssektor) mit einem Stoffstrommodell (zur Berechnung der ausgelösten Umweltwirkungen), um szenarienmäßig mögliche Trade-offs zwischen der Bereitstellung von treibhausgasreduziertem („low carbon“) „warmen Wohnraum“ und dadurch ausgelösten Sekundäreffekten bei der Bereitstellung der benötigten Dämmmaterialien und Erzeugung erneuerbarer Energien zu analysieren. Mit „Umweltwirkungen“ sind dabei sowohl Ressourcenverbräuche auf der Inputseite als auch Emissionen auf der Outputseite gemeint.

Kapitel 1 beginnt mit einer detaillierten Beschreibung des entwickelten Modellkonzepts, indem ausgehend von Zielen und Aufgabenstellung von AS6.2 die Notwendigkeit hergeleitet wird, das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ zu analysieren, und der Aufbau des entwickelten Bottom-up Wirkungsanalyse Modells dargestellt wird.

Die *Kapitel 2-5* beschreiben, wie das Bottom-up Wirkungsanalyse Modell implementiert wurde.

Kapitel 2 enthält eine Beschreibung des Technologiemoells *HEAT*, mit dem der Energiebedarf, die CO₂-Emissionen sowie Einsparmaßnahmen und deren Kosten im Haushaltssektor, differenziert nach 44 Gebäudetypen, innerhalb von Szenarien bis zum Jahr 2050 modelliert werden kann.

Dem schließt sich in *Kapitel 3* das mit der Software Umberto entwickelte Stoffstrommodell an, mit dem die durch die Investitionen im Gebäudesektor ausgelösten Umweltwirkungen (sowohl auf der Ressourcen- als auch auf der Emissionsseite) ebenfalls bis 2050 berechnet werden können.

In *Kapitel 4* folgt die Erstellung der MaRess-Langfrist-Szenarien. Nach einer detaillierten Begründung, warum entgegen der ursprünglich geplanten Vorgehensweise keine Ressourcenpolitikansätze aus den Arbeitspaketen 3 (Innovative Ressourcenpolitikansätze zur Gestaltung der Rahmenbedingungen), 4 (Innovative Ressourcenpolitikansätze auf Mikroebene: Unternehmensnahe Instrumente und Ansatzpunkte) und 12 (Konsumenten- und kundennahe Ansätze zur Ressourceneffizienzsteigerung) genutzt werden konnten, wird stattdessen auf Ziele der Klimapolitik zurück gegriffen, und es werden entsprechende Langfrist-Energieszenarien entwickelt.

Kapitel 5 beschreibt die verschiedenen Treiber, die auf die vier Szenarien wirken. Dies sind externe Parameter, die durch den Gesamtpolitikrahmen beeinflusst werden (wie zum Beispiel die Bevölkerungsentwicklung); energetische Parameter, die sich aus dem jeweiligen Energiemix der vier Szenarien ergeben (zum Beispiel der Strommix); Gebäudeparameter, die über die Energieszenarien hinaus Vorgaben für die Sanierung im Haushaltsbereich machen (zum Beispiel Sanierungsrate), sowie Varianten in den betrachteten Produktvorketten (zum Beispiel die Art der modellierten Dämmmaterialien).

In *Kapitel 6* werden ausgehend von den vier Szenarien mithilfe des *HEAT*-Modells unterschiedlich große Effizienzanstrengungen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ modelliert, die in entsprechende Investitionen in zusätzliche Dämmung und alternative Heizsysteme münden. Gleichzeitig werden für jedes Energieszenario die Zusammensetzung des jeweiligen Strom- und Wärmemixes modelliert und die Technologien ökobilanztechnisch abgebildet, die für das Stoffstrommodell benötigt werden.

Kapitel 7 gibt die zentralen Ergebnisse der Langfrist-Modellierung wieder. Dies ist einerseits die Nachfrage nach Dämmmaterialien, Primärenergie und Heizungsanlagen, die sich aus der Modellierung in *HEAT* für jedes Jahrzehnt bis zum Jahr 2050 ergeben. Diese Material- und Energieströme werden an das Stoffstrommodell übergeben. In einem zweiten Schritt folgen dann die Ergebnisse aus der Ökobilanzierung, die den Trade-off zwischen Effizienzmaßnahmen und Mehrverbrauch an Dämmmaterialien darstellen. In einer Sensitivitätsanalyse werden schließlich die Fälle betrachtet, wenn statt des standardmäßig eingesetzten Dämmstoffs XPS die Alternative Zellulose verwendet wird.

In *Kapitel 8* werden die Ergebnisse zusammengefasst, Schlussfolgerungen gezogen und Politikempfehlungen gegeben. Der Bericht schließt mit dem Aufzeigen zukünftigen Forschungsbedarfs.

1 Modellkonzept

1.1 Ziele und Aufgabenstellung

Ziel des Arbeitsschrittes 6.2 war es, am Beispiel eines ausgewählten Bedarfsfeldes beispielhaft zu analysieren, wie sich Politikansätze zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Summe auf die Ressourcenbilanz auswirken und mit welchem Erfolg sie umgesetzt werden könnten. Dies beinhaltet drei Untersuchungsebenen:

- Durch die Entwicklung und beispielhafte Anwendung eines *Bottom-up Wirkungsanalyse Modells* sollte es ermöglicht werden, sowohl die direkten als auch die indirekten Wirkungen eines von den Arbeitspaketen 3 (Innovative Ressourcenpolitikansätze zur Gestaltung der Rahmenbedingungen), 4 (Innovative Ressourcenpolitikansätze auf Mikroebene: Unternehmensnahe Instrumente und Ansatzpunkte) und 12 (Konsumenten- und kundennahe Ansätze zur Ressourceneffizienzsteigerung) identifizierten Polycymixes zu ermitteln, also quasi eine „Netto“-Bilanzierung der aus verschiedenen Politikansätzen resultierenden Ressourcenströme durchzuführen. Auf diese Weise können sowohl direkte Wechselwirkungen als auch Trade-offs und Synergieeffekte zwischen betrachteten Maßnahmen ermittelt werden.
- Neben den Auswirkungen auf den Ressourcenbereich selbst sollten gleichzeitig auch Wechselwirkungen mit anderen gesellschaftspolitischen Zielen (insbesondere den Klimaschutzzielen) analysiert werden. So ist angesichts klimapolitischer Vorgaben in Deutschland und der Europäischen Union zu fragen, ob Maßnahmen zur Verringerung der Ressourcenströme im Einklang mit den Reduktionszielen für Treibhausgas-Emissionen stehen. Weitere emissionsseitige Umweltwirkungsbereiche sind zum Beispiel der Sommersmog, die Versauerung von Böden und Gewässern oder die Belastung durch Feinstäube, die mithilfe eines *Ökobilanzierungs Modells* ermittelt werden können.
- Durch die Anwendung und Übertragung der im Energiesektor gängigen Szenarioanalyse wurde es zudem möglich, die Auswirkungen verschiedener Ressourcenpolitikansätze im gleichen Bedarfsfeld zu modellieren und ihre Auswirkungen und Unterschiede gegenüberzustellen. Indem gleichzeitig nicht nur die Ist-Situation, sondern die Entwicklung auf der Zeitachse bis zum Jahr 2050 modelliert wurde, konnten zudem *Langfrist-Auswirkungen* analysiert werden. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn die Auswirkungen von Ressourceneffizienzmaßnahmen einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten betreffen.

Die Erfahrungen bei der Modellierung des ausgewählten Bedarfsfeldes und der entwickelten Methodik sollten schließlich hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Bedarfsfelder analysiert werden. Dieser Teil der Analyse ist Inhalt des Papers 6.1 „*Übertragbarkeit des Bottom-up Wirkungsanalyse-Modells auf andere Bedarfsfelder*“. Es zeigt, dass das hier entwickelte Modell unter zwei Voraussetzungen auf andere Bedarfsfelder übertragbar ist: Einerseits müssen messbare Indikatoren zur Verfügung

stehen, mit denen die Wirkung von Politikinstrumenten abgebildet werden kann; andererseits muss für das jeweilige Bedarfsfeld ein Technikmodell einsatzbereit sein, mit dem Veränderungen der gewählten Indikatoren im Zeitablauf szenarienmäßig berechnet werden können. Dies ist beispielsweise im Bedarfsfeld „Mobilität und Verkehr“ mit dem TREMOD-Modell gegeben, das im Auftrag des Umweltbundesamtes durch das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) entwickelt wurde (vgl. ifeu 2010).

1.2 Das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ als Teil des Bedarfsfelds „Bauen und Wohnen“

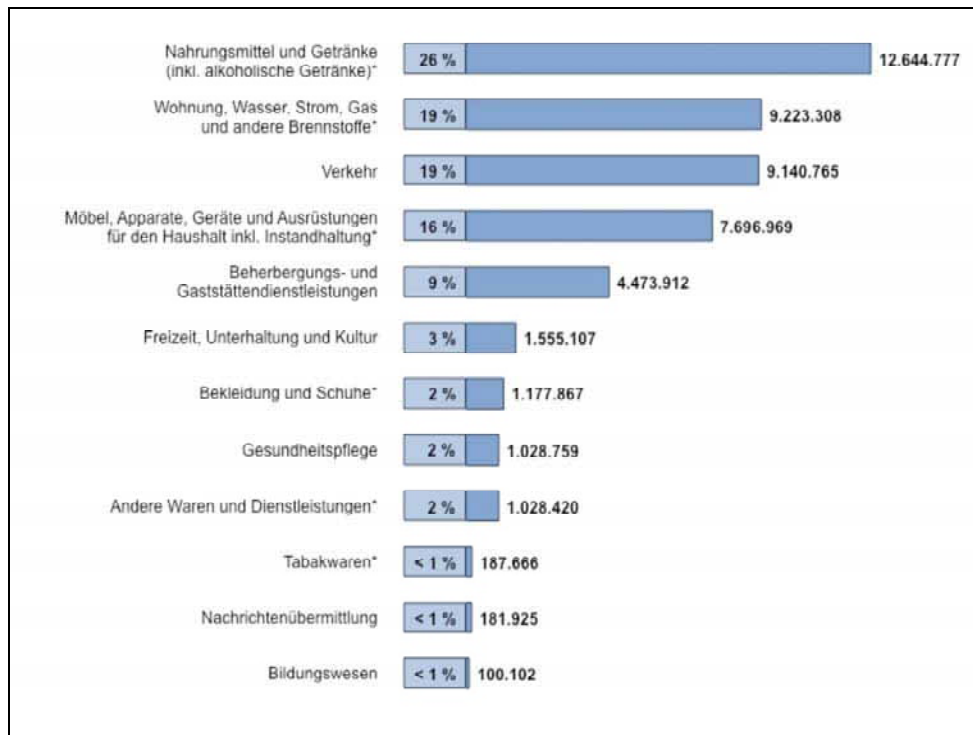
Von verschiedenen in Frage kommenden Bedarfsfeldern (zum Beispiel „Bauen und Wohnen“, „Mobilität und Verkehr“, „Freizeit“, „Gesundheit“ und „Ernährung“) wurde zu Beginn das Bedarfsfeld „Bauen und Wohnen“ und hierin das Teil-Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ ausgewählt. Dieses Bedarfsfeld umfasst nach der hier vorgenommenen Definition die Nachfrage nach „Warmem Wohnraum“ in Deutschland. „Warmer Wohnraum“ kann mittels Heizungsanlagen auf fossiler und erneuerbarer Basis, mittels Stromheizung über fossilen Strom oder erneuerbare Energien oder auch durch energetische Optimierung (zum Beispiel Wärmedämmung) von Gebäuden erreicht werden. Neben dem Bestand an Wohnungen werden auch die Zu- und Abgänge bis zum Jahr 2050 betrachtet.

Für die Auswahl dieses Bedarfsfeldes waren verschiedene Gründe ausschlaggebend:

- Das Bedarfsfeld „Bauen und Wohnen“ ist hinsichtlich des direkten und indirekten globalen Materialaufwandes der inländischen sektoralen Produktion ein Hot-spot Bereich. Der globale Materialaufwand (TMR = Total Material Requirement) beschreibt den absoluten Stoff- beziehungsweise Materialmengenstrom, der durch einen bestimmten Bedarf ausgelöst wird. Hier werden auch die indirekten Ströme mitbilanziert, so dass die gesamte Wirkungskette enthalten ist (auch als „ökologischer Rucksack“ bezeichnet). Abb. 1-1 zeigt die Anteile der Bedarfsfelder am globalen Materialaufwand. Die Gesamtmaterialmenge betrug im Jahr 2000 48.439 Mio. t TMR, wobei das Bedarfsfeld „Wohnung, Wasser, Strom und Gas“ mit 19% an zweiter Stelle steht und neben der Nahrungsmittelproduktion (26%) und dem Verkehr (19%) einen der drei Hot-spots darstellt.

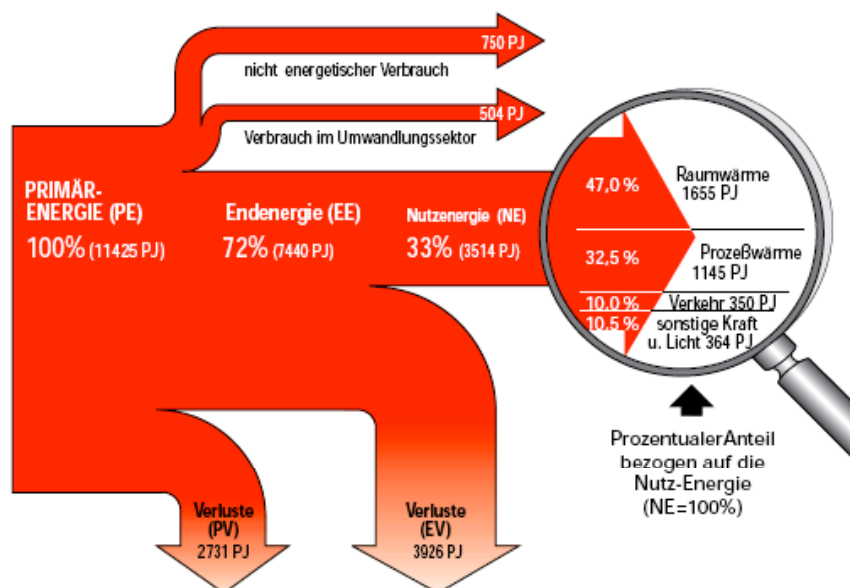
Analysiert man zudem den Verbrauch der energetischen Ressourcen, so zeigt sich die herausragende Bedeutung des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“. In Abb. 1-2 ist das Energieflussbild des deutschen Energiesystems für die alten Bundesländer im Jahr 1990 aufgezeigt. Aus ihr wird deutlich, dass nur rund 33% der als Primärenergieträger in das System eingehenden Energie beim Verbraucher als Energiedienstleistung nutzbar sind. Von der so entstehenden Nutzenergie entfallen allein 47% auf die Energiedienstleistung „Warmer Wohnraum“, die somit den größten Hot-spot Bereich darstellt.

Abb. 1-1: Anteile der Bedarfsfelder am Globalen Materialaufwand [in 1.000 t TMR] - induzierter direkter und indirekter TMR durch die inländische Produktion für die privaten Haushalte Deutschlands im Jahr 2000



Quelle: Acosta-Fernandez et al. 2009

Abb. 1-2: Beispiel eines Primär-, End- und Nutzenergieflussbildes für die alten Bundesländer im Jahr 1990



Quelle: Wuppertal Institut und Planungs-Büro Schmitz Aachen (2000)

- Trotz der hohen Bedeutung des Gebäudebereichs für die Ressourcenfrage sind Effizienzstrategien dagegen bisher eher rudimentär behandelt worden, so dass hier erstmals Energieeinsparstrategien und die dadurch ausgelöste Nachfrage nach Dämmstoffen gegenüber gestellt werden können.
- Maßnahmen zur Einsparung von Energie und Emissionen im Gebäudebereich gehen bisher implizit davon aus, dass keine negativen Trade-offs entstehen. Ob beispielsweise die Wirkung von Energiesparmaßnahmen möglicherweise durch die für die Herstellung der Dämmmaterialien benötigte Energie wieder aufgehoben wird, lässt sich in einer Überschlagsrechnung vergleichsweise einfach abschätzen. Welche Wechselwirkungen sich letztendlich aus energie- und prozessbedingten Emissionen in Hinblick auf unterschiedliche Umweltwirkungen ergeben, ist dagegen weniger offensichtlich und oft wesentlich von der Ausgestaltung der betrachteten Prozessketten abhängig. Durch die Kopplung eines Gebäude-Energiemodells mit einem Stoffstrommodell kann dies hier erstmals gezielt untersucht werden.
- Insbesondere durch den hohen Aufwand nicht-energetischer Ressourcen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ ist zudem eine Analyse der Trade-offs zwischen eher energie- und emissionsgetriebenen und stärker ressourceneffizienzgetriebenen Strategien interessant.
- Nicht zuletzt existiert für die in diesem Bereich relevanten Energieflüsse eine vom Wuppertal Institut entwickelte Bottom-up Methodik, die in dem stock-exchange Gebäudemodell *HEAT* umgesetzt wurde. Innerhalb dieses Modells ist es möglich, die Energieflüsse bis auf Komponentenebene und nach einer vielschichtigen Gebäudetypologie zu differenzieren. Zudem können in dem Modell die Auswirkungen von Wärmedämmmaßnahmen und einer Umstellung auf alternative Heizenergiesysteme abgebildet werden.

Vom Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ abgegrenzt werden muss das Bedarfsfeld „Bauen“, das im Rahmen dieses Projekts aus Kapazitätsgründen nicht betrachtet werden konnte. Eine Veränderung des eigentlichen Baubestandes, die Instandhaltung sowie die bei den Optionen Abriss, Neubau oder Recycling entstehenden Stoffströme sollten in einem Nachfolgeprojekt in die Betrachtung integriert werden.

1.3 Das Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“

Zur Umsetzung der oben dargestellten Ziele wurde das im Folgenden beschriebene Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“ entwickelt. Abb. 1-3 zeigt die verschiedenen Module, aus denen das Modell aufgebaut ist.

Modul 1: Modellierung des Bedarfsfelds „Warmer Wohnraum“ mit *HEAT*

Innerhalb des Technologiemoells *HEAT* wird in einer Langfristbetrachtung bis zum Jahr 2050 für verschiedene Szenarien, die sich aus ressourcenpolitischen Vorgaben ableiten, die Entwicklung des Endenergiebedarfs für den Wohnungssektor modelliert, aufgeteilt nach Energiearten. Gleichzeitig wird die direkte Nachfrage nach Dämmstoff-

fen ermittelt, wobei zum Beispiel bei der Berechnung von Dämmstoffmengen eine Auswertung der prognostizierten Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten von Gebäudehüllen erfolgt. Betrachtet wird der gesamte Gebäudebestand inklusive Zu- und Abgängen in Deutschland zu den jeweiligen Zeitpunkten 2005, 2010, 2020, 2030, 2040 und 2050.

Im Rahmen des AS6.2 war nicht vorgesehen, eventuell weitere benötigte Baumaterialien, zusätzliche Energiesparmaßnahmen wie den Austausch von Fenstern oder auch den restlichen Baubestand zu bilanzieren. Dies kann jedoch mithilfe der in diesem Pilotprojekt aufgebauten Methodik zukünftig nach entsprechender Datenerhebung ergänzt werden. Ebenso sollte zukünftig auch eine Modellierung auf Haustypen-Ebene erfolgen, so dass detaillierte Aussagen nach einzelnen Regionen und Baualtersklassen getroffen werden können.

Modul 2: Umweltwirkungsanalyse

Die mit *HEAT* berechneten Mengen aus jährlichem Zubau an Dämmstoffen und jährlichem Endenergie-Einsatz in Heizungssystemen im gesamten Gebäudebestand werden anschließend zur Ermittlung ihrer Umweltwirkungen in Stoff- und Energieflussmodelle eingespeist, die mit der Software *Umberto* erstellt werden. Hierbei werden auch direkte Vorgaben aus den MaRess-Szenarien berücksichtigt, die der Tatsache Rechnung tragen, dass ein zukünftig veränderter Strommix erheblichen Einfluss auf die Ökobilanz der Stromerzeugung selbst wie auch energieintensiver Produktionsprozesse (zum Beispiel von Dämmstoffen) haben kann.

Die Bilanzergebnisse werden schließlich einer Umweltwirkungsabschätzung unterzogen, wodurch eine ökologische Gesamtbewertung von eingesetzten Materialien und Energiemengen an Hand verschiedener Umweltwirkungsindikatoren und unter Berücksichtigung der jeweiligen Bereitstellungsvorketten möglich wird. Diese beinhalten Wirkungskategorien auf der Emissionsseite (zum Beispiel Sommersmog, Versauerung von Böden und Gewässern oder die Belastung durch Feinstäube) und auf der Inputseite (energetische und nicht-energetische Rohstoffe).

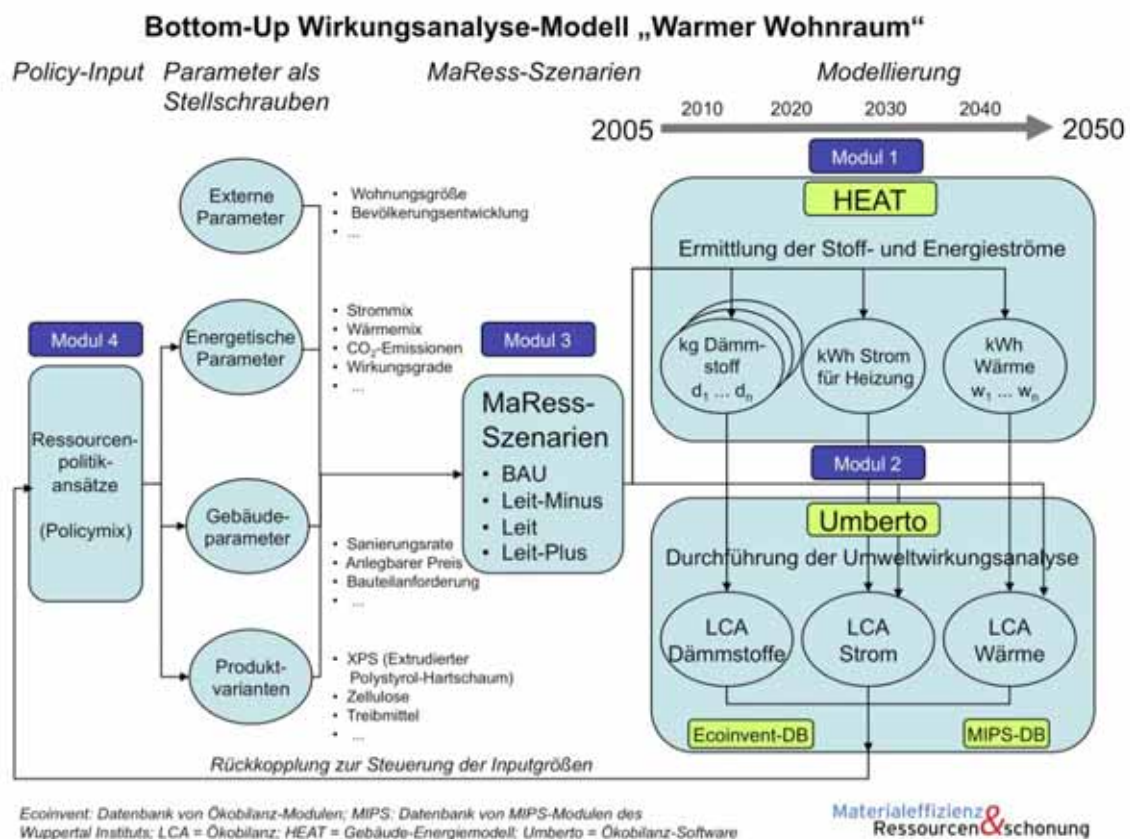
Modul 3: MaRess-Szenarien

Die Modellierung innerhalb von *HEAT* und *Umberto* basiert auf der Definition und Ausgestaltung verschiedener „MaRess Szenarien“. Diese beschreiben – in einer Langfristspektive – mögliche Entwicklungspfade zur Reduzierung des Energiebedarfs (und damit energetischer Ressourcen) des privaten Gebäudesektors. Die Szenarien spannen einen Fächer zwischen niedriger und sehr hoher (politischer) Eingriffstiefe auf. Sie sind zunächst am Instrumentarium der Energiemodellierung orientiert, da hier jahrzehntelange Erfahrung und konkrete politische Vorgaben beziehungsweise Absichtserklärungen vorliegen. Dementsprechend orientieren sie sich an der Zielgröße „CO₂-Einsparung bis zum Jahr 2050 bezogen auf das Basisjahr 1990“.

Für das hier im Fokus stehende Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ ergeben sich jedoch dennoch entscheidende Vorgaben, die mit entsprechenden Ressourcenverbräuchen einher gehen:

- die sukzessive Reduktion des Gebäudeenergiebedarfs, die in erhöhte Dämmmaßnahmen mündet;
- die zunehmende Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien sowie
- ein ebenso zunehmend durch erneuerbare Energien geprägter Strommix, der für einen (kleinen) Teil der Gebäudeheizung relevant ist und auch in die Herstellung der benötigten Dämmmaterialien einfließt.

Abb. 1-3: Modellkonzept für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“



Quelle: Eigene Entwicklung

Modul 4: Policymix und Einflussparameter

Treiber für die verschiedenen Szenarien sind entsprechende Einflussparameter, die sich durch den Policymix einer Ressourcenpolitik ergeben. Diese auch als Stellschrauben bezeichneten Größen bestimmen den Fächer an Szenarien, der eine Bandbreite möglicher Entwicklungen bis zum Jahr 2050 aufzeigt. Hierzu zählen

- *externe Parameter*, die nicht direkt durch den Policymix, jedoch durch den Gesamtpolitikrahmen beeinflusst werden (zum Beispiel die zukünftige Veränderung der Wohnungsgröße, betrachtet für die verschiedenen Haustypen, oder generell die langfristige Bevölkerungsentwicklung);
- *energetische Parameter*, hier als durchschnittliche Zusammensetzung des Wärmeangebots und des Stromangebots an Haushalte und Industrie sowie Nutzungsgrade der Kraftwerke betrachtet (direkter Einfluss auf Emissionen und Ressourcenverbrauch der Hausheizungen; indirekter Einfluss durch die Vorkette bei der Herstellung von Produkten);
- *Gebäudeparameter* wie etwa die zu erwartende Sanierungsrate im Gebäudebestand, Anforderungen an Bauteilbeschaffenheiten oder anlegbare Preise bezogen auf die Kosten von Sanierungsmaßnahmen;
- *Produktvarianten*, bezogen auf die bei der Sanierung benötigten Dämmmaterialien oder Heizungsanlagen und deren zukünftig in Produktionsprozessen zu erwartenden Veränderungen (ausgelöst zum Beispiel durch technische Innovationen, durch Reduktion des Material- und Energieeinsatzes oder durch Substitution einzelner Produkte durch Ersatzstoffe).

Das Policymix-Modul bekommt schließlich von Modul 2 über den zeitlichen Verlauf verschiedener Wirkungsindikatoren den Grad der Zielerreichung der ursprünglichen Politikansätze zurückgemeldet. Hierdurch wird es möglich, bei Verfehlen der Zielmarken die Politikansätze zu justieren und zu optimieren und die MaRess-Szenarien entsprechend anzupassen.

Die folgenden Kapitel geben eine genauere Darstellung, wie die einzelnen der hier vorgestellten Module implementiert wurden.

2 Implementierung des Technologiemoells (Modul 1)

2.1 Einsatz von wohnungs- und siedlungspolitischen Instrumenten

Die Abbildung von Politikinstrumenten verlangt eine weiterreichende Differenzierung von politischen Eingriffen in der Tiefe und in der Breite. Dazu sind (computergestützte) thermische Gebäudesimulationen (die für die Bewertung von gebäudespezifischen Einsparmaßnahmen unverzichtbar sind) allein in der Regel nicht ausgelegt. Die zugrunde liegenden mathematischen Modelle umfassen üblicherweise:

- die (dynamische) Wärmeleitung von bauphysikalischen Systemen wie Wände, Decken, Dächer, Fenster, und ähnliches,
- die konvektiven Wärmeübergänge,
- den Temperaturstrahlungsaustausch,
- Luftströmungen im Raum,
- Energiebilanzen an Außenoberflächen von Bauteilen,
- Berechnung von internen Wärmequellen,
- Wärmeabgabe von Heizflächen.

Die Abbildung von wohnungs- und siedlungspolitischen Instrumenten verlangt daneben jedoch eine Erweiterung des Gesamtsystems „Wärmeversorgung von (Einzel-) Gebäuden“. Für die Gesamtbewertung einer integrierten CO₂- und Ressourcen-Minderungspolitik sind die Modelle hinsichtlich der Abbildung von Wirkungszusammenhängen in den Bereichen

- der ordnungsrechtlichen Maßnahmen,
- der Auswirkungen von finanzieller Förderung und
- einer gezielten Öffentlichkeitsarbeit

zu erweitern.

2.2 Der *HEAT*-Buildings Modellrahmen

Das EDV-System *HEAT* (Household Energy and Appliances modelling Tool) dient der Energie- und Emissionsbilanzierung sowie dem -monitoring im Haushaltssektor und enthält neben einer differenzierten Haushaltsgeräteseite zur Ermittlung des Strombedarfes auf der Wärmeseite eine bauteilspezifische Modellierung des Gebäudebestands Deutschlands. Sie lässt sich an regionale und datentechnische Anforderungen anpassen und kann in ihrer größten Ausprägung 64 Gebäudetypen differenzieren. Abb. 2-1 enthält die wichtigsten Gebäudetypen des deutschen Gebäudebestandes, differenziert nach Gebäudegröße und Gebäudealter.

Ferner wird das *HEAT*-Modell zur Zeit – unabhängig von MaRes – auf einen sogenannten Siedlungstypenansatz weiter entwickelt, der es erlaubt, analog zum Haustypenansatz verschiedene infrastrukturelle Einsparinstrumente sowie zukünftige siedlungsbezogene Versorgungsalternativen abzubilden.

Schließlich findet eine Erweiterung auf dem Gebiet der Klimatisierung statt, die analog zur Berechnung des Heizenergiebedarfes mittels der Simulation über den Haustypologienansatz den Klimatisierungsaufwand bei steigenden Innentemperaturen durch zum Beispiel hohe Verglasungsanteile, Passivhausbauweisen usw. ermittelt sowie den Aspekt der steigenden Außentemperaturen im Rahmen von Langfristszenarien aufgreift.

Abb. 2-1: Der deutsche Gebäudebestand im Jahr 2006

| Deutsche Gebäudetypologie – Häufigkeit von Gebäudetypen unterschiedlichen Baualters | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|--------|
| Gebäudetypen* | | Baualtersklassen | | | | | | | | | | Summe | Anteil |
| | | vor 1918 A | vor 1918 B | 1919 - 1948 C | 1949 - 1957 D | 1958 - 1968 E | 1969 - 1978 F | 1979 - 1983 G | 1984 - 1994 H | 1995 - 2001 I | 2002 - 2006 J | | |
| | EFH | | | | | | | | | | | | |
| | Wohnfläche in Tsd. m² | 81.503 | 148.776 | 168.937 | 174.251 | 235.409 | 223.135 | 112.631 | 236.441 | 255.280 | 103.208 | 1.739.571 | 52% |
| | Anz. Wohneinh. in Tsd. | 916 | 1.707 | 2.010 | 1.915 | 2.274 | 1.867 | 936 | 2.055 | 1.994 | 671 | 16.345 | 42% |
| | RH | | | | | | | | | | | | |
| | Wohnfläche in Tsd. m² | | 14.543 | 31.450 | 21.993 | 35.996 | 61.478 | 24.503 | 32.951 | 33.366 | 11.675 | 267.955 | 8% |
| | Anz. Wohneinh. in Tsd. | | 145 | 326 | 231 | 340 | 517 | 202 | 281 | 285 | 83 | 2.418 | 6% |
| | MFH | | | | | | | | | | | | |
| | Wohnfläche in Tsd. m² | 31.974 | 109.337 | 135.827 | 117.051 | 149.881 | 122.930 | 61.044 | 118.019 | 154.740 | 24.267 | 1.025.070 | 31% |
| Anz. Wohneinh. in Tsd. | 462 | 1.501 | 2.034 | 1.912 | 2.210 | 1.677 | 821 | 1.712 | 2.240 | 296 | 14.865 | 38% | |
| GMH | | | | | | | | | | | | | |
| Wohnfläche in Tsd. m² | | 31.549 | 10.160 | 38.936 | 47.501 | 46.124 | | | | | 174.270 | 5% | |
| Anz. Wohneinh. in Tsd. | | 448 | 169 | 703 | 784 | 697 | | | | | 2.801 | 7% | |
| HH | | | | | | | | | | | | | |
| Wohnfläche in Tsd. m² | | | | | 12.617 | 12.988 | | | | | 25.605 | 1% | |
| Anz. Wohneinh. in Tsd. | | | | | 190 | 190 | | | | | 394 | 1% | |
| MFH NBL | | | | | | | | | | | | | |
| Wohnfläche in Tsd. m² | | | | 14.324 | 24.418 | | | | | | 38.742 | 1% | |
| Anz. Wohneinh. in Tsd. | | | | 329 | 400 | | | | | | 737 | 2% | |
| GMH NBL | | | | | | | | | | | | | |
| Wohnfläche in Tsd. m² | | | | | | 22.976 | 19.899 | 17.977 | | | 60.852 | 2% | |
| Anz. Wohneinh. in Tsd. | | | | | | 390 | 336 | 305 | | | 1.031 | 3% | |
| HH NBL | | | | | | | | | | | | | |
| Wohnfläche in Tsd. m² | | | | | | 16.823 | 4.230 | | | | 21.053 | 1% | |
| Anz. Wohneinh. in Tsd. | | | | | | 310 | 67 | | | | 377 | 1% | |
| Wohnfläche in Tsd. m² | 113.477 | 304.205 | 346.374 | 366.555 | 505.822 | 506.454 | 222.307 | 405.388 | 443.386 | 139.150 | 3.353.118 | | |
| Anteil | 3% | 9% | 10% | 11% | 15% | 15% | 7% | 12% | 13% | 4% | | | |
| Anz. Wohneinh. in Tsd. | 1.378 | 3.801 | 4.539 | 5.090 | 6.222 | 5.656 | 2.362 | 4.353 | 4.519 | 1.050 | 38.970 | | |
| Anteil | 4% | 10% | 12% | 13% | 16% | 15% | 6% | 11% | 12% | 3% | | | |

*) EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhäuser, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus, HH = Hochhaus, NBL = neue Bundesländer

* 1) EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhäuser, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus, HH = Hochhaus, NBL = neue Bundesländer

Quelle: IWU (2009)

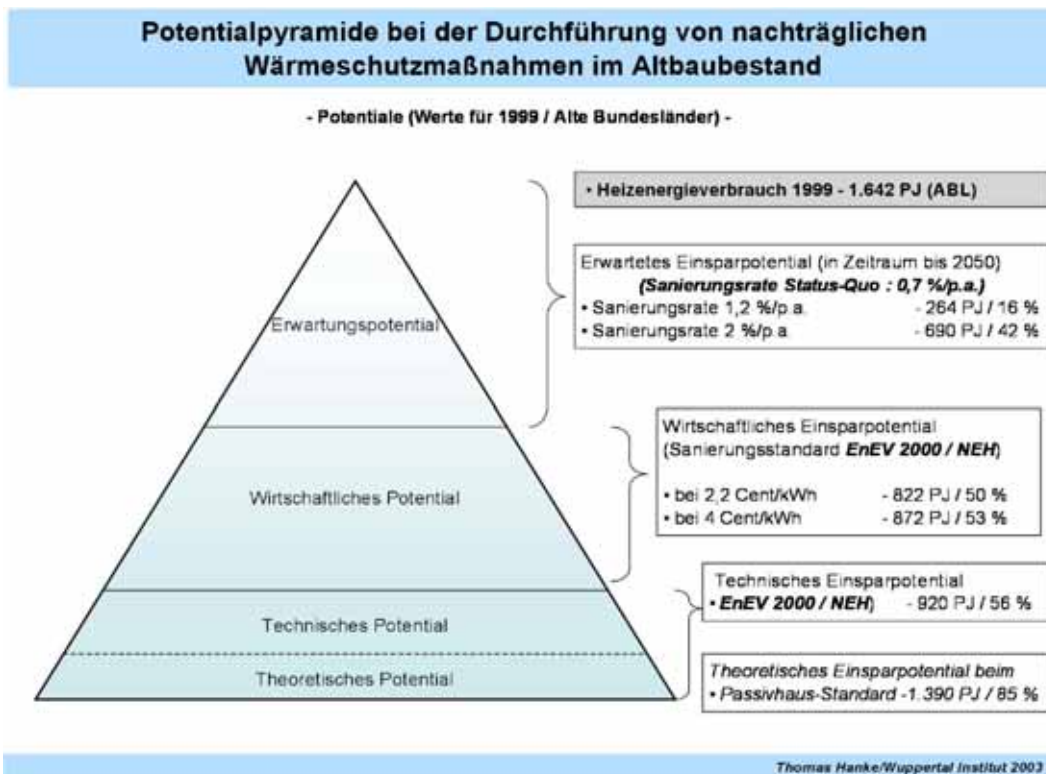
Da im Weiteren der Modellteil der Gebäudesimulation ausschließlich für die vorliegende Untersuchung verwendet worden ist, werden die Bezeichnungen *HEAT-Buildings* sowie *HEAT* äquivalent verwendet beziehungsweise der Zusatz *-Buildings* weggelassen. Gemeint ist in der Regel immer der Gebäude-Modellteil.

2.3 Die *HEAT*-„Philosophie“

Ansatzpunkte zur Einsparung des Energiebedarfes können recht unterschiedlich sein und reichen von rein technischen Maßnahmen (Leitindikator: *Effizienzstandards*) bis hin zu Veränderungen im Umgang mit Energie und Lebensstilen (Suffizienzmaßnahmen, zum Beispiel Lüftungsverhalten). Eines der zentralen Probleme bei der Auswahl von Einsparmaßnahmen ist, von welchen Faktoren eine hohe Umsetzung dieser Maßnahmen (Leitindikator: *Umsetzungsrate*) abhängig ist (Wahl der Technik, Kosten usw.) und wie sich Einsparmaßnahmen erfolgversprechend installieren lassen. Diese zentralen Gesichtspunkte versucht das *HEAT*-Modell in seiner zu Grunde liegenden „*HEAT*-Philosophie“ zu berücksichtigen.

Der Umsetzung von Maßnahmen stehen dabei verschiedene Hemmnisse entgegen, die auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelt sind. Dabei lassen sich diese Ebenen als Schichten einer Pyramide darstellen, bei der nach oben immer weniger des ursprünglich zur Verfügung stehenden Potenzials erreichbar ist (siehe Abb. 2-2).

Abb. 2-2: Potenzialpyramide



Quelle: Eigene Darstellung

Das Modell *HEAT* verarbeitet Eingriffe in den Wärmemarkt auf den drei Ebenen:

1. Technisches und theoretisches Potenzial,
2. wirtschaftliches Potenzial,
3. Erwartungs- und Umsetzungspotenzial.

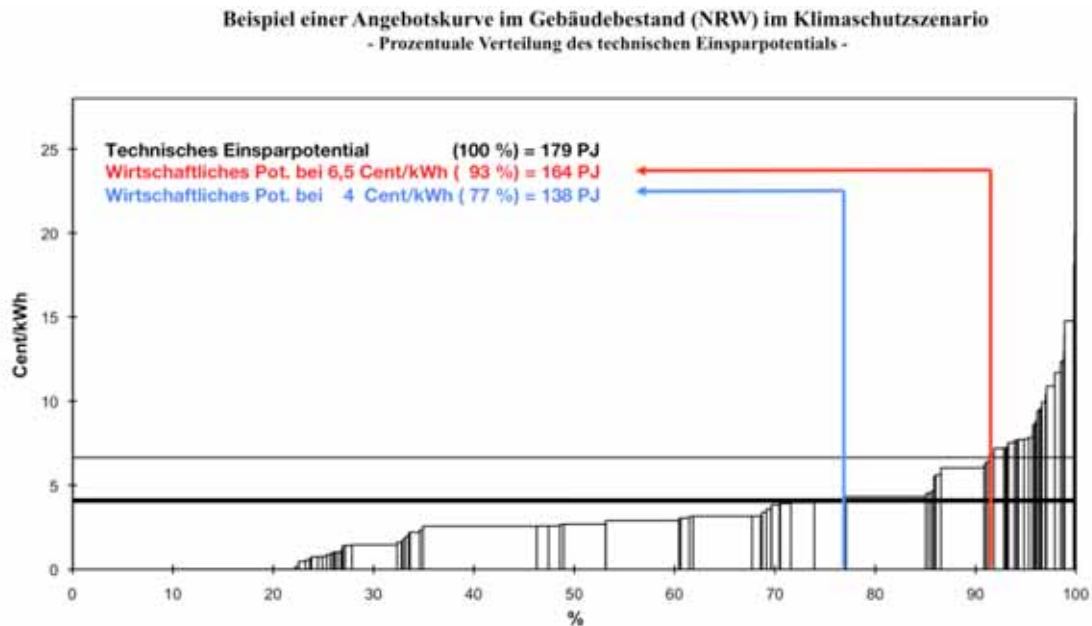
Alle Maßnahmen, die den Energieverbrauch auf der Wärmeseite senken, fasst man unter dem *technischen Potential* zusammen. Damit sind Maßnahmen gemeint, die unter Berücksichtigung der heute eingesetzten und bekannten Techniken zur Verfügung stehen. Techniken, die zum Beispiel erst unter Laborverhältnissen Anwendung finden, die also mit den derzeitigen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Kenntnissen begründet werden können, aber noch nicht marktfähig sind, werden unter dem Begriff *theoretisches Potential* zusammengefasst. Damit kann *HEAT* reine Potenzialszenarien auf der Grundlage von Zukunftstechnologien verarbeiten.

Bei den meisten Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebereich bestehen derzeit geringe wirtschaftliche Anreize, um in wärmeschützende Dämmung und Fenster zu investieren, da bei derzeitigen Energiepreisen keine ökonomische Notwendigkeit besteht, Brennstoffe einzusparen. Maßnahmen, die unter das *wirtschaftliche Potential* fallen, sind aus betriebswirtschaftlicher Sicht günstiger als der Energiepreis. Das wirtschaftliche Potential steigt generell an, wenn der mittlere zukünftige Energiepreis unter Berücksichtigung der externen Kosten berechnet wird. Dieser Prozess kann durch Veränderung der Rahmenbedingungen (zum Beispiel Energiesteuer, strengere Verordnungen) oder durch die Minimierung der Produktionskosten von Dämmsystemen (zum Beispiel Massenfertigung) erfolgen.

HEAT berücksichtigt Energieeinsparmaßnahmen auf der Grundlage ökonomischer Vorgaben innerhalb einer Wirtschaftlichkeitsgrenze beziehungsweise eines -bereiches und bilanziert weiterhin die (annuitätischen) betriebswirtschaftlichen Einzelkosten von Maßnahmen bis zu den volkswirtschaftlichen Gesamtkosten. In der Abb. 2-3 ist eine so genannte Angebotskurve aufgetragen. Sie verdeutlicht, welche Einsparmaßnahmen bei Anlegung eines externen Preises auf der y-Achse (zum Beispiel Energiepreis) unterhalb dieser gesetzten Wirtschaftlichkeitsgrenze liegen und welche Gesamteinsparung zu erzielen ist (x-Achse).

Auch den Maßnahmen, deren betriebswirtschaftliche Rentabilität gewährleistet ist, steht eine Vielzahl von Umsetzungshemmnissen gegenüber. Daher reduzieren sich die Umsetzungsraten auf ein sogenanntes *Erwartungspotential*. Zum großen Teil sind die detaillierten Informationen über Einsparmaßnahmen an der Gebäudehülle oder die Möglichkeiten, das eigene Verhalten zu korrigieren, nicht bekannt, oder es besteht eine Ungleichheit von Aufwendungen zum Nutzen von Energieeinsparungen („Investor-Nutzer-Dilemma“). *HEAT* enthält Funktionen, die mittels Expertenschätzungen oder empirischen Untersuchungen innerhalb des Szenarioprozesses sogenannte Umsetzungspfade generieren.

Abb. 2-3: Angebotskurve der Einsparung im Gebäudebestand (am Beispiel von Nordrhein-Westfalen)



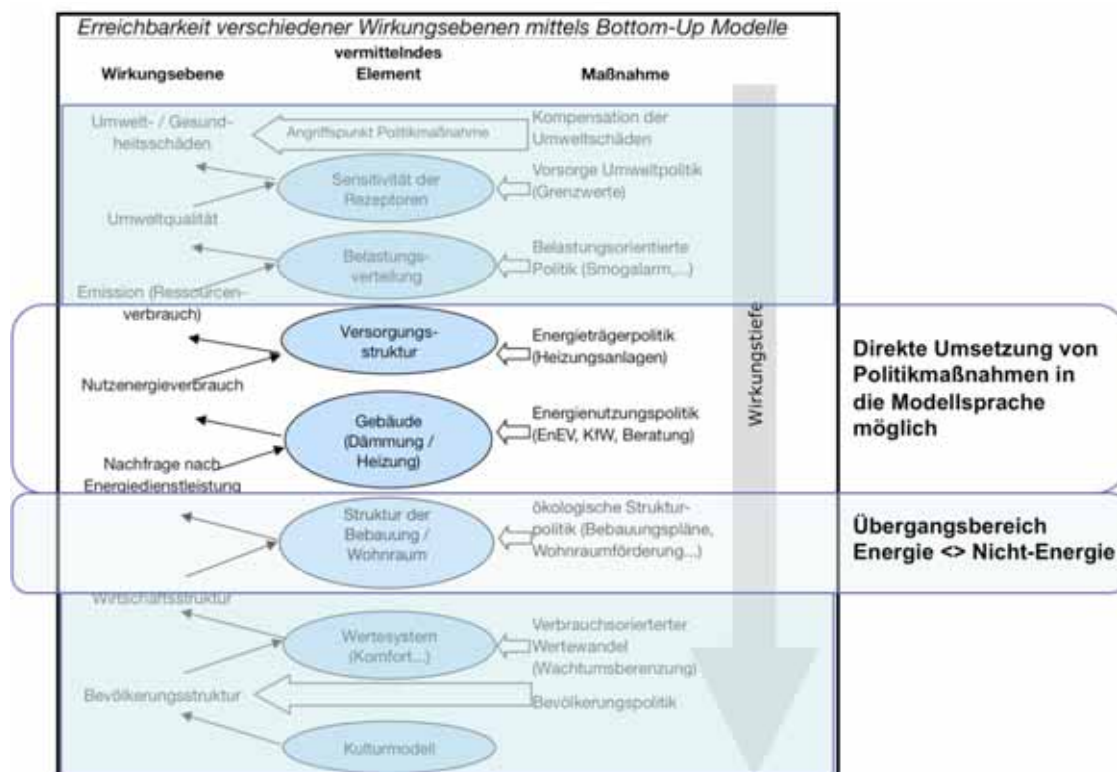
Quelle: Eigene Darstellung

2.4 Der Einsatz von *HEAT* in MaRes

Wie oben dargelegt, ist *HEAT* darauf ausgerichtet, Maßnahmen auf den verschiedenen Ebenen der politischen Eingriffe in das Energiesystem abzubilden. Diese reichen, wie die Abb. 2-4 illustriert, von reinen Kompensationsmaßnahmen bis zu Eingriffen in Werte- und Kulturmodelle von Gesellschaften. Die geeignete Ebene von politischen Maßnahmen im Raumwärmebereich privater Haushalte liegt auf der technischen Ebene, beispielsweise durch Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV), des erneuerbaren Energien-Wärmegesetzes und der Heizanlagenverordnungen. Flankiert wird dieser Bereich durch Maßnahmen einer ökologischen Strukturpolitik (zum Beispiel Verhaltensänderungen, Ausschreibung Passivhäusern in Bebauungsplänen).

Daher eignet sich diese Vorgehensweise für die Analyse von Wirkungszusammenhängen auf der wärmetechnischen Seite und deren Auswirkungen auf der Material- und Ressourcenseite. Durch die Weiterentwicklung und die Hinzunahme der MIPS-Indikatoren abiotischer Verbrauch, biotischer Verbrauch, Wasser und Luft sowie Brennstoffverbrauch konnten innerhalb des Modells *HEAT* (am Beispiel der Dämmvarianten XPS und Zellulose) auch die Nettoeffekte gesondert berechnet werden, das heißt der Material- und Energiemehraufwand gegenüber den Material- und Energieeinsparungen durch wärmetechnische Maßnahmen im Altbaubestand analysiert werden.

Abb. 2-4: Erreichbarkeit von Politikinstrumenten auf verschiedenen Ebenen des Bottom-up Wirkungsanalyse-Modells



Quelle: Eigene Darstellung (nach Prittwitz 2007)

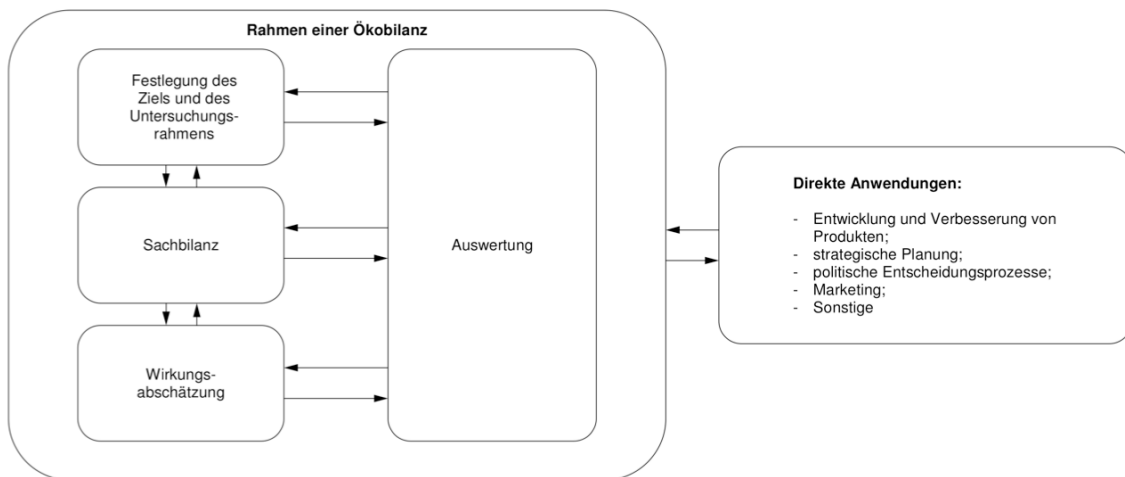
3 Implementierung des Stoffstrommodells (Modul 2)

Wie im Modellkonzept dargestellt, werden die in HEAT bestimmten direkten Materialflüsse einer Umweltwirkungsanalyse unterzogen, die im Rahmen einer Ökobilanz durchgeführt wird.

Die ISO-Normen 14040 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“ (DIN 2006a) und 14044 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“ (DIN 2006b) dienen der Erstellung von Produktökobilanzen auf einer einheitlichen Grundlage, wobei ein methodischer Rahmen definiert wird, aber keine Methodenfestlegung für einzelne Schritte erfolgt. Die Anwendung der Norm soll die Transparenz und Glaubwürdigkeit von Ökobilanzstudien erhöhen und ihre Vergleichbarkeit untereinander gewährleisten.

Die hier durchgeführte Ökobilanz-Untersuchung stellt keine vollständig ISO-konforme Studie dar, orientiert sich aber dennoch an den dort festgelegten und in Abb. 3-1 dargestellten Arbeitsschritten: Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, Erstellung einer Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. Detaillierte Beschreibungen des Ökobilanz-Rahmens nach ISO 14040/14044 können den entsprechenden Normen entnommen werden.

Abb. 3-1: Rahmen einer Ökobilanz nach ISO 14044/14044



Quelle: DIN 2006a:16

3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Stoffstromanalyse ist es, direkte Material- und Energieflüsse, die aus HEAT übernommen werden, unter Berücksichtigung der von ihnen verursachten indirekten Ressourcenextraktionen und Emissionen im Zeitverlauf in Hinblick auf verschiedene Umweltbeeinträchtigungen und deren Interdependenzen analysieren zu können. Dies zielt darauf ab, Wechselwirkungen von politischen Maßnahmen zur effizienten Nutzung

von Energieressourcen (Dämmstrategien) mit anderen gesellschaftspolitischen Zielen (insbesondere Klimaschutzzielen) zu identifizieren.

In methodischer Hinsicht ist es auch Ziel der Untersuchung, Möglichkeiten zur Dynamisierung sonst oft statischer Ökobilanz-Modelle aufzuzeigen. Hierzu werden verschiedene Modellparameter variabel gestaltet, in Tabellen verwaltet und mit dem Stoffstrommodell verknüpft.

Der *Untersuchungsrahmen* wird zunächst definiert durch das Produktsystem, das Gegenstand der Analyse ist. Dieses besteht aus der Summe der berücksichtigten Teilprozesse und Stoffströme – hier drei wesentlichen Komponenten, die in einem Stoffstromnetz in der Ökobilanz-Software Umberto als miteinander verknüpfte Submodelle angelegt sind. Stoffstromnetze bestehen aus miteinander verknüpften Prozessen oder Transitionen, die als Orte der Stoffumwandlung Materialinputs (Rohstoffe, Vorprodukte) in Materialoutputs (Produkte, Emissionen und Abfälle) transformieren. Die Stoffströme werden unter Berücksichtigung der Flussrichtung, die durch Verbindungen vorgegeben werden, über sogenannte Stellen an weitere Prozesse verteilt oder passieren als In- oder Outputs die Systemgrenze des bilanzierten Produktsystems.

Die Submodelle, die auch auf der in Abb. 3-2 dargestellten Hauptebene des Modells erkennbar sind, werden im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

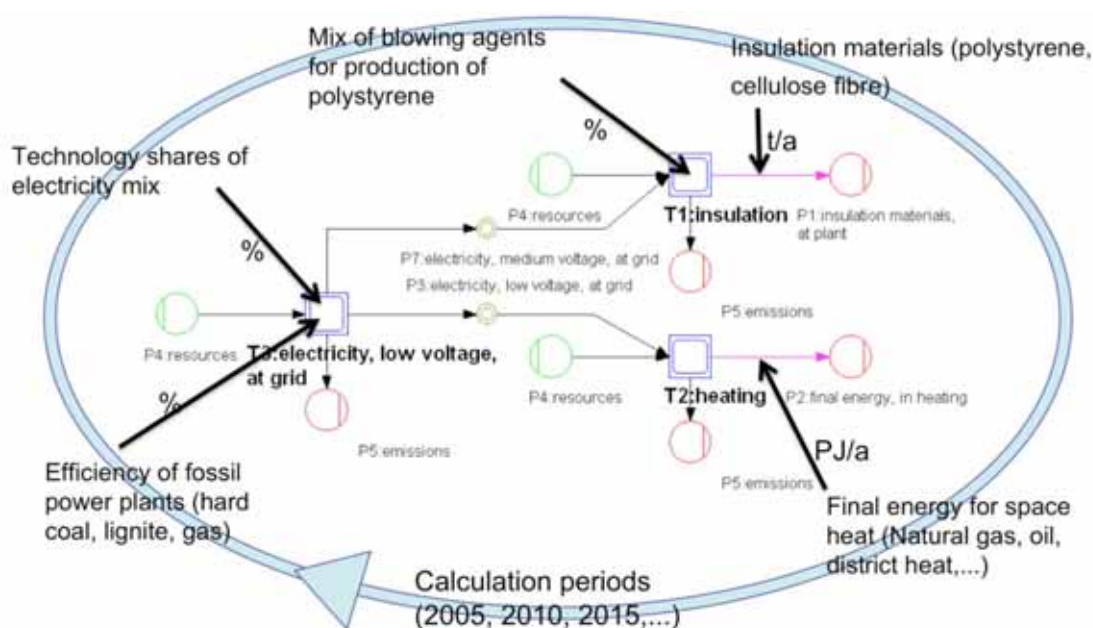
- *Herstellung von Dämmstoffen (Submodell T1, „Insulation“)*: Das Modell umfasst für die Dämmstoffe Zellulose und XPS Aufwendungen der Herstellung, Verpackung und Transport der Produkte unter Einbeziehung der Produktions-Infrastruktur. Im Fall der Zellulose-Flocken ist der zusätzliche Strombedarf für das Einblasverfahren des Dämmstoffes ebenfalls berücksichtigt.
- *Gebäudebeheizung (Submodell T2, „Heating“)*: Bestandteile des Modells sind die Bereitstellungsvorketten der Endenergieträger bis zur Gewinnung der Rohstoffe, Anlageninfrastruktur (zum Beispiel Heizkessel oder Öltank) sowie der Eigenstromverbrauch der Heizungstechnologien.
- *Strombereitstellung (Submodell T3, „Electricity, at grid“)*: Dieses Submodell stellt Strom ab Netzanschlusspunkten auf der Mittel- und Niederspannungsebene bereit, der von Prozessen in den beiden anderen Submodellen angefordert wird, um ihren direkten Bedarf etwa zur Herstellung von Polystyrol-Dämmstoff oder zum Betrieb von elektrischen Wärmepumpen zu decken. Das Modell bildet die Stromgestehung in Deutschland ab und beinhaltet Kraftwerksinfrastruktur, Brennstoffbereitstellung und -umwandlung sowie Stromtransporte unter Berücksichtigung von Verlusten sowie Transport- und Verteilinfrastruktur (Hoch-, Mittel- und Niederspannungstransport und Umspannung).

Durch die Definition von Abschneidekriterien lassen sich Stoffströme von der Bilanzierung ausschließen, deren voraussichtlicher Beitrag zur Gesamtumweltwirkung als unwesentlich eingestuft wird. Hierzu wurden keine eigenen Festlegungen getroffen, da für die Bilanzierung auf vorhandene Ökobilanz-Module aus eigenen Projekten oder kom-

merziellen Datenbanken zurückgegriffen wurde. Es gelten die Angaben in den jeweiligen Prozessbeschreibungen der Datenbank-Anbieter.

Als Bezugsgröße von Ökobilanzergebnissen werden aus der Funktion eines Produktsystems eine funktionelle Einheit sowie ein aus ihr resultierender Referenzfluss definiert. ISO 14040 nennt als Beispiel die Funktion des Händetrocknens mit zwei verschiedenen Produktsystemen, die Heißluft beziehungsweise Papier einsetzen. Als funktionelle Einheit kann dann die Anzahl getrockneter Handpaare definiert werden, Referenzfluss kann die benötigte Masse Papier oder das benötigte Volumen Heißluft sein. (DIN 2006a:24).

Abb. 3-2: Hauptnetz des Stoffstrommodells und periodenabhängige Inputs von Referenzflüssen und Parametern



Quelle: Eigene Darstellung

Im vorliegenden Modell wird als *Funktion* des Systems die Bereitstellung von warmem Wohnraum definiert. Als *funktionelle Einheit* kann der zu beheizende Wohngebäudebestand in Deutschland betrachtet werden, der für jedes Stützjahr des Modells durch HEAT ermittelt wird. Durch HEAT bereitgestellt werden dann mögliche Kombinationen aus jährlichem Zubau an Dämmstoffen in t/a und jährlichem Endenergie-Einsatz in Heizungssystemen in PJ/a, die geeignet sind, die Systemfunktion zu erfüllen. Diese Material- und Endenergiemengen stellen die Referenzflüsse der Stoffstromanalyse dar, die für jede Berechnungsperiode in das in Abb. 3-2 gezeigte Modell eingespeist werden. Der Datensatz in Tab. 3-1 zeigt beispielhaft die Referenzflüsse, die im Szenario MaRes BAU für jede Berechnungsperiode von HEAT an das Stoffstrommodell übergeben werden.

Tab. 3-1: Referenzflüsse im Szenario *MaRes BAU*

| Ökobilanz-Referenzfluss HEAT | Ein- heit | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--|--------------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| XPS-Dämmung | kg | 0,0 | 58161,1 | 58161,1 | 58161,1 | 81425,6 | 104690,0 | 46034,4 |
| Konv. Fernwärme | PJ | 160,8 | 157,1 | 153,5 | 146,7 | 116,3 | 103,2 | 90,0 |
| REG-Nahwärme Solar | PJ | 0,0 | 3,6 | 3,6 | 7,2 | 10,8 | 14,4 | 18,0 |
| REG-Nahwärme Geothermie | PJ | 0,7 | 3,2 | 9,0 | 12,0 | 16,0 | 33,0 | 50,0 |
| REG-Nahwärme Biomasse | PJ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Fernwärme Summe (Zentral) | PJ | 161,5 | 163,9 | 166,1 | 165,9 | 143,1 | 150,6 | 158,0 |
| Öl-NT (Zentral) | PJ | 900,6 | 823,5 | 790,4 | 733,8 | 571,0 | 466,1 | 343,7 |
| Gas-NT (Zentral) | PJ | 1002,1 | 894,4 | 808,8 | 679,1 | 573,4 | 459,9 | 346,6 |
| Kohle-Z (Zentral) | PJ | 11,0 | 10,2 | 10,5 | 9,6 | 9,4 | 8,2 | 6,9 |
| Strom-Z (Zentral) | PJ | 3,7 | 3,5 | 3,3 | 3,1 | 3,0 | 2,1 | 1,5 |
| Gas (Etag) | PJ | 99,1 | 84,7 | 75,8 | 73,4 | 70,4 | 42,6 | 35,5 |
| Öl (Einzel) | PJ | 18,0 | 13,8 | 8,4 | 5,0 | 4,6 | 4,1 | 3,5 |
| Gas (Einzel) | PJ | 9,5 | 8,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Kohle (Einzel) | PJ | 29,1 | 15,7 | 4,7 | 4,5 | 4,2 | 3,7 | 3,0 |
| Strom (Einzel) | PJ | 124,8 | 111,6 | 106,4 | 104,6 | 96,6 | 56,2 | 34,9 |
| Strom-WP (Effizienz) | PJ | 8,1 | 8,1 | 8,5 | 10,8 | 10,8 | 14,9 | 16,4 |
| Gas-WP (Effizienz) | PJ | 0,0 | 0,4 | 0,7 | 1,6 | 2,4 | 2,9 | 4,3 |
| Gas-Brennwert (Effizienz) | PJ | 2,4 | 78,4 | 119,9 | 201,1 | 361,0 | 469,5 | 490,8 |
| Solar (Effizienz) | PJ | 5,0 | 9,7 | 11,9 | 13,5 | 18,0 | 29,0 | 40,0 |
| Biomasse (Effizienz) | PJ | 27,0 | 26,0 | 24,0 | 23,0 | 20,0 | 18,1 | 16,3 |
| REG = Regenerative Energie; NT = Niedertemperatur; WP = Wärmepumpe | | | | | | | | |

Quelle: eigene Berechnungen

Bestandteil des Untersuchungsrahmens ist auch die Festlegung des Systems, mit dessen Hilfe die Abschätzung der Umweltwirkungen der ermittelten Stoff- und Energieströme erfolgen soll. Die Umweltwirkungsabschätzung erfolgt hier nach der CML-Methode unter Berücksichtigung ihrer Baseline-Indikatoren (siehe Kapitel 3.3).

3.2 Sachbilanz

Jedes der in Kapitel 3.1 genannten Submodelle wird auf untergeordneten Ebenen durch entsprechende Subnetze konkretisiert. Um die Kompatibilität des Stoffstrommodells mit dem Gebäudemodell, auf dem es aufbaut, zu gewährleisten, ist es zunächst notwendig, die in *HEAT* berücksichtigten Heizungstypen und Dämmstoffe in einem Stoffstromnetz zu spiegeln – ihnen also äquivalente Umwandlungs- beziehungsweise Bereitstellungs-Prozessketten gegenüberzustellen.

Tab. 3-2: Produkte und Technologien in *HEAT* und ihre Äquivalenzprozesse im Stoffstrommodell

| Produkte und Heizungs-systeme in HEAT | Durch Äq.-Prozess dargestellt zu... | Äquivalenzprozesse im Stoffstrommodell | Quelle |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------|
| Dämmstoff XPS | 100% | Polystyrol, extrudiert (XPS), ab Werk [RER] | ecoinvent 2.1 |
| Dämmstoff Zellulose | 100% | Zellulosefasern, inklusive Einblasen, ab Werk [CH] | ecoinvent 2.1 |
| Öl-Zentralheizung | 100% | Heizöl EL, in Heizkessel 100kW, nicht-modulierend [CH] | ecoinvent 2.0 |
| Öl-Einzelheizung | 100% | Heizöl EL, in Heizkessel 10kW, nicht-modulierend [CH] | ecoinvent 2.0 |
| Gas-Etagenheizung | 100% | Erdgas, in Heizkessel atm. Brenner nicht-mod. <100kW [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Gas-Zentralheizung | 100% | Erdgas, in Heizkessel atm. LowNOx kond. nicht-mod. <100kW [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Gas-Einzelheizung | 100% | Erdgas, in Heizkessel atm. LowNOx nicht-mod. <100kW [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Gas-Brennwert | 100% | Erdgas, in Heizkessel Gebläsebrenner LowNOx nicht-mod. <100kW [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Kohle-Einzelheizung | 50% | Braunkohle-Brikett, in Einzelofen 5-15kW [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Kohle-Einzelheizung | 50% | Steinkohle-Brikett, in Einzelofen 5-15kW [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Kohle-Zentralheizung | 100% | Steinkohle-Brikett, in Einzelofen 5-15kW [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Biomasse | 90% | Pellets, Holzmix, in Feuerung 15kW [CH] | ecoinvent 2.0 |
| Biomasse | 10% | Stückholz, Holzmix, in Feuerung 30kW [CH] | ecoinvent 2.0 |
| Gas-Wärmepumpen | 100% | Erdgas, in Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe 4kW, zukünftig [CH] | ecoinvent 2.0 |
| Solarheizung | 100% | Sonnenenergie umgew. in Flachkollektoranlage, Einfamilienhaus, für Wärmespeicher [CH] | ecoinvent 2.0 |
| Konventionelle Fernwärme (HKW StK) | 50% | Nutzwärme, ab HKW Steinkohle, Allokation GEMIS | Umberto Standard Library 5.5 |
| Konventionelle Fernwärme (HKW Gas) | 50% | Nutzwärme, ab BHKW 1MWel Mager, Allokation Exergie [RER] | ecoinvent 2.0 |
| REG-Nahwärme Solar | 100% | Nutzwärme, ab solarer Nahwärmanlage, Kies-Wasser-Speicher | DLR et al. (2004) |
| REG-Nahwärme Geothermie | 100% | Wärme, ab Geothermiekraftwerk Hot Dry Rock | DLR et al. (2004) |
| REG-Nahwärme Biomasse | 100% | Nutzwärme, ab BHKW, mit Gasmotor, Biogas Landw. abgedeckt, Allokation Exergie [CH] | ecoinvent 2.0 |
| Strom-Zentralheizung | 100% | Strom, Niederspannung, Produktion DE, ab Netz [DE] | ecoinvent 2.0 |
| Strom-Einzelheizung | 100% | Strom, Niederspannung, Produktion DE, ab Netz [DE] | ecoinvent 2.0 |
| Strom-Wärmepumpe | 100% | Strom, Niederspannung, Produktion DE, ab Netz [DE] | ecoinvent 2.0 |

REG = Regenerative Energie; HKW = Heizkraftwerk, Quelle: eigene Zusammenstellung

In den meisten Fällen wurde hierbei auf vorhandene Datensätze aus der LCA-Prozessdatenbank ecoinvent in der Version 2.0 und 2.1 zurückgegriffen, die auf Grundlage eigener Annahmen ausgewählt wurden. So wird beispielsweise der *HEAT*-Heizungstyp „Kohle-Einzelheizung“ im Stoffstromnetz zu jeweils 50% mit Hilfe der Prozesse „Braunkohle-Brikett, in Einzelofen 5-15 kW“ und „Steinkohle-Brikett, in Einzelofen 5-15 kW“ abgebildet. Eine Übersicht der jeweils gewählten Äquivalenzprozesse zeigt Tab. 3-2.

Die genannten ecoinvent-Prozessmodule werden in Ökobilanzen meist als sogenannte Result-Prozesse verwendet, die das durch sie beschriebene System als Black-box des gesamten Lebensweges abbilden und dessen Stoffströme kumuliert ausweisen. Die Verwendung dieser Module bietet sich an, wenn keine Änderungen an verwendeten Prozessen vorgenommen werden sollen. Es ist dagegen aber nicht möglich, aus ihrer Spezifikation Rückschlüsse darauf zu ziehen, welcher Anteil der ausgewiesenen Emissionen auf einzelne Vorprozesse entfällt.

Sollen dagegen ecoinvent-Prozesse gemäß eigener Annahmen geändert werden (etwa in Form der Anpassung des Strombezugs an einen veränderten Strommix), so bietet sich stattdessen die Nutzung von Unit-Prozessen an, die ebenfalls Bestandteil der ecoinvent-Datenbank sind. Sie weisen outputseitig ausschließlich direkte Emissionen des Prozesses aus, den sie beschreiben (zum Beispiel Luftemissionen der Ölverbrennung in einer Ölheizung). Als Inputs listen ihre Spezifikationen keine kumulierten Elementarflüsse (zum Beispiel chemische Verbindungen) der gesamten Prozesskette auf, sondern nennen weitere Prozesse, die dem Unit-Prozess vorgeschaltet werden müssen, um eine explizite Darstellung seiner Prozesskette zu erhalten. Im Fall der Ölheizung handelt es sich dabei zum Beispiel um Prozesse der Bereitstellung von Heizöl und Strom sowie der Anlageninfrastruktur (Heizkessel, Kamin und Öltank). Ein Beispiel für die Result- (links) und Unit-Darstellung (rechts) desselben Heizöl-Moduls zeigt Abb. 3-3 auszugsweise.

Abb. 3-3: Result- und Unit-Prozesse in ecoinvent

| Var. | P. | Material | Coefficient | Unit |
|------|----|---|-------------|------|
| Y001 | P4 | Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude | 1.4501E-6 | kg |
| Y002 | P4 | Anhydrite, in ground [resource/in ground] | 1.077E-10 | kg |
| Y003 | P4 | Bentonite, 15% in crude ore, in ground [resource/in ground] | 0.0010437 | kg |
| Y004 | P4 | Basalt, in ground [resource/in ground] | 1.6436E-6 | kg |
| Y005 | P4 | Bentonite, in ground [resource/in ground] | 5.587E-10 | kg |
| Y006 | P4 | Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb 2.111E-9 | | kg |
| Y007 | P4 | Calcite, in ground [resource/in ground] | 0.00036806 | kg |
| Y008 | P4 | Carbon dioxide, in air [resource/in air] | 1.2518E-5 | kg |

| Var. | P. | Material | Coefficient | Unit |
|-------|----|---|-------------|------|
| TT001 | P6 | light fuel oil, burned in boiler 10kW, non-em | 1 | MJ |
| Y001 | P5 | 1,4-Butanediol [air/high population density] | 7.357E-15 | kg |
| Y002 | P5 | 2-Propanol [air/high population density] | 2.190E-10 | kg |
| Y003 | P5 | Acenaphthene [air/high population density] | 6.345E-15 | kg |
| Y004 | P5 | Acenaphthene [air/low population density] | 9.051E-16 | kg |
| Y005 | P5 | Acenaphthene [air/unspecified] | 9.055E-10 | kg |
| Y006 | P5 | Acetaldehyde [air/high population density] | 1.1596E-8 | kg |
| Y007 | P5 | Acetaldehyde [air/low population density] | 1.090E-11 | kg |

| Var. | P. | Material | Coefficient | Unit |
|-------|----|---|-------------|------|
| PT001 | P1 | light fuel oil, at regional storage [CH] | 0.02342 | kg |
| PT002 | P1 | oil boiler 10kW [CH, infra] | 1.6138E-7 | unit |
| PT003 | P1 | chimney [CH, infra] | 1.3228E-6 | unit |
| PT004 | P1 | oil storage 3000 [CH, infra] | 1.4082E-7 | unit |
| Y01 | P3 | electricity, low voltage, production DE, at 1.0036528 kWh | | kg |

| Var. | P. | Material | Coefficient | Unit |
|-------|----|--|-------------|------|
| TT001 | P6 | light fuel oil, burned in boiler 10kW, non-em | 1 | MJ |
| Y001 | P5 | Heat, waste [air/high population density] | 1.0716 | MJ |
| Y002 | P5 | Acetaldehyde [air/high population density] | 2.05E-8 | kg |
| Y003 | P5 | Acetone [air/high population density] | 5E-8 | kg |
| Y004 | P5 | Acrolein [air/high population density] | 1.15E-8 | kg |
| Y005 | P5 | Hydrocarbons, aliphatic, alkenes, unsat | 2.5E-7 | kg |
| Y006 | P5 | Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated [air] | 2E-8 | kg |
| Y007 | P5 | Hydrocarbons, aromatic [air/high population density] | 2E-8 | kg |
| Y008 | P5 | Hydrocarbons, aromatic [air/high population density] | 4E-8 | kg |

Quelle: Umberto-Screenshot

Um im Rahmen der Modellbildung Parametervariationen abbilden zu können, wurde deshalb an verschiedenen Stellen auf Unit-Prozesse zurückgegriffen, deren Vorketten entsprechend angepasst wurden. Dies gilt insbesondere für alle Prozesse mit direktem Strombezug: Hier wird die Nachfrage über Verbindungen in das eigene dynamische Strom-Submodell gedeckt, anstatt den statischen Strommix der ecoinvent-Prozesskette zu verwenden.

Auch im Strom-Submodell selbst wurden Unit-Prozesse verwendet, um ein Stoffstrommodell zu erstellen, das ab der Bereitstellung von Strom auf der Nieder- und Mittelspannungsebene in Upstream-Richtung den Stromtransport und die nach Kraftwerkstechnologien differenzierte Umwandlung explizit abbildet. Auf diese Weise ist es möglich, über die Variation von Wirkungsgraden fossiler Kraftwerke und insbesondere die Anpassung des Erzeugungsmixes direkt auf die Vorkette der Strombereitstellung Einfluss zu nehmen und mögliche zukünftige Entwicklungen wie in Energieszenarien dargestellt in die Ökobilanz zu integrieren. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass nur der Mix, überwiegend aber nicht die technischen Eigenschaften der Kraftwerke verändert werden, so dass weitere technische Fortschritte etwa im Bereich des Upscalings von Windkraftanlagen zunächst unberücksichtigt bleiben. Der beschriebenen Methode der Abbildung umfangreicher Prozessketten mit Hilfe von Unit-Prozessen sind zudem Grenzen in der Handhabbarkeit gesetzt, da sie den Berechnungsaufwand des Modells sehr ansteigen lässt.

Um Konsistenz mit dem Strommix der Leitstudie zu erreichen, der den meisten MaRess-Szenarien zu Grunde liegt, wurden die in ecoinvent modellierten Kraftwerkstypen teilweise durch weitere ergänzt. Die in der Leitstudie genannten Technologien sowie ihre Äquivalente im Stoffstromnetz sind in Tab. 3-3 aufgelistet.

Bezüglich der Datengrundlage des Stoffstrommodells kann festgehalten werden, dass auf Grund fehlender Prozessdaten teilweise vereinfachende Annahmen getroffen werden mussten. Dies gilt etwa im Bereich der Stomerzeugung für erdgas- und ölbefeuerte Heizkraftwerke, die mangels umfassender HKW (Heizkraftwerk)-Ökobilanzmodule zusammengefasst und als Erdgas-BHKW (Blockheizkraftwerk) modelliert wurden. Hier gilt es, in zukünftigen Untersuchungen vorhandene Ökobilanz-Datenbestände zu aktualisieren und zu ergänzen. Sofern verwendete Prozessbeschreibungen nicht aus der ecoinvent Datenbank oder einer kompatiblen Quelle stammen, ergeben sich zudem Datenlücken, die auf einer sehr begrenzten Auswahl bilanzierter Materialflüsse oder auf Inkompatibilitäten mit der in ecoinvent verwendeten Nomenklatur beruhen. Davon betroffen sind insbesondere die Modellierung von regenerativer Nahwärme, konventioneller Fernwärme und Geothermie-Kraftwerken. Hinsichtlich der Datenqualität und -vollständigkeit der verwendeten ecoinvent-Prozesse gelten zudem die in den jeweiligen ecoinvent-Reports beschriebenen Einschränkungen.

Tab. 3-3: Kraftwerkstypen in der *Leitstudie 2008* und ihre Äquivalenzprozesse im Stoffstrommodell

| Kraftwerkstypen der Leitstudie 2008 | Durch äquiv. Prozess dargestellt zu... | Äquivalenzprozesse im Stoffstrommodell | Quelle |
|-------------------------------------|--|--|------------------------------|
| Europ. Verbund EE | 75% | Strom, Parabelspiegel, ab Kraftwerk, DNI2000, mit Speicher | NEEDS-Datenbank (NEEDS 2009) |
| Europ. Verbund EE | 25% | Strom, ab Windkraftanlage 2MW, Offshore [OCE] | ecoinvent 2.0 |
| Photovoltaik | 100% | Strommix, Photovoltaik, ab Anlage [DE] | ecoinvent 2.0 |
| Geothermie | 100% | Strom, ab Geothermiekraftwerk Hot Dry Rock | DLR et al. (2004:113) |
| Wind Offshore | 100% | Strom, ab Windkraftanlage 2MW, Offshore [OCE] | ecoinvent 2.0 |
| Wind an Land | 100% | Strom, ab Windkraftanlage [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Laufwasser | 100% | Strom, Wasserkraft, ab Kraftwerk [DE] | ecoinvent 2.0 |
| Biomasse, biogen. Abfälle | 100% | Strom, ab BHKW mit Gasmotor, Biogas, Allokation Exergie [CH] | ecoinvent 2.0 |
| KWK, Kohle, Gas | 100% | Strom, ab BHKW 1MWel Mager, Allokation Exergie [RER] | ecoinvent 2.0 |
| Erdgas, Öl Kond. | 100% | Strom, ab Erdgas-Kraftwerk [DE] | ecoinvent 2.0 |
| Braunkohle Kond. | 100% | Strom, ab Braunkohlekraftwerk [DE] | ecoinvent 2.0 |
| Steinkohle Kond. | 100% | Strom, ab Steinkohlekraftwerk [DE] | ecoinvent 2.0 |
| Kernenergie | 100% | Strom, ab Kernkraftwerk [DE] | ecoinvent 2.0 |

EE = Erneuerbare Energien; KWK = Kraft-Wärme-Kopplung

Quelle: Eigene Zusammenstellung aufbauend auf BMU 2008

Nach der Abbildung aller zu berücksichtigenden Prozesse im Stoffstromnetz erfolgt die Berechnung der Ökobilanz für die jeweiligen Referenzflüsse. Ergebnis dieser Berechnung ist die Sachbilanz. Sie stellt eine Auflistung aller Energie- und Materialströme dar, die die Grenzen des Untersuchungssystems input- oder outputseitig (als Rohstoff, Produkt, Abfall oder Emission) passieren.

3.3 Wirkungsabschätzung

Die Einzelwerte einer Sachbilanz sagen wenig über die Umweltwirkung eines Systems aus, denn die Flussgrößen verschiedener Materialien können sich in verschiedener Weise und Größenordnung auf mehrere Umweltmedien auswirken. Die Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) soll potenzielle Umweltwirkungen kenntlich und vergleichbar machen, indem sie die Sachbilanzergebnisse mit Umweltwirkungskategorien verknüpft.

Hierzu sind gemäß (DIN 2006a:46 ff) drei Schritte erforderlich:

1. *Methodenauswahl*: Aus dem umfassenden Angebot unterschiedlicher LCIA-Methoden muss eine Auswahl getroffen werden, die in Hinblick auf das Untersu-

chungsziel geeignete Wirkungskategorien und Indikatoren zur Verfügung stellt, mit deren Hilfe relevante Umweltwirkungen quantifiziert werden können. Sind etwa Treibhausgasemissionen Untersuchungsschwerpunkt, so wird eine Kategorie „Klimawirkung“ benötigt.

2. *Klassifizierung*: Alle Stoffströme werden dann verschiedenen Wirkungskategorien der gewählten Methode zugeordnet, wobei Mehrfachzuordnungen möglich sind. Zum Beispiel werden Klassen von Stoffströmen gebildet, die einen Beitrag zu Klimawandel (etwa CO₂, CH₄ und N₂O), Ozonabbau, Eutrophierung oder Schädigung von Ökosystemen leisten.
3. *Charakterisierung*: Die Stoffströme einer Kategorie werden dann entsprechend ihres spezifischen Beitrages zur identifizierten Umweltwirkung in Äquivalente einer Referenzsubstanz umgerechnet und zusammengefasst. Hierdurch wird z. B. berücksichtigt, dass CH₄ und insbesondere N₂O deutlich stärker zum Klimawandel beitragen als CO₂. Das Resultat der Berechnung ist ein numerischer Wert für jeden Indikator – z. B. das Erderwärmungspotenzial (Global Warming Potential, GWP) in kg CO₂-Äquivalenten. Weitere optionale Bestandteile wurden im Rahmen der hier durchgeführten Wirkungsabschätzung nicht berücksichtigt.

Die beschriebenen Schritte können durch die Auswahl und Verwendung eines bestehenden Wirkungsabschätzungssystems abgedeckt werden. Zur Anwendung kommt hier im Hinblick auf das Untersuchungsziel die im „Handbook on Life Cycle Assessment“ beschriebene CML-Methode (siehe Guinée et al. 2002:63ff). Die Methode umfasst die Bereitstellung von Umweltwirkungsindikatoren, ordnet alle Materialflüsse den jeweiligen Indikatoren zu und führt anschließend Charakterisierungen innerhalb jeder Klasse von Materialflüssen durch. Sie verfügt über eine breite internationale Anwenderschaft und zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine Vielzahl unterschiedlicher Beeinflussungen verschiedener Umweltmedien abdeckt. Sie ist zudem Bestandteil der ecoinvent Datenbank und deshalb auch mit der Nomenklatur der dort verwendeten Materialbezeichnungen kompatibel. Das Abschätzungssystem kann daher ohne Anpassungsbedarf direkt auf die berechneten Sachbilanzen angewendet werden. Die CML-Methode dient zur Bestimmung der folgenden Wirkungsindikatoren (Guinée et al. 2002:63 ff):

Emissionsindikatoren

- *Überdüngungspotenzial [EP in kg PO₄-Äq.]*: Eutrophierende Wirkungen entstehen durch ein überhöhtes Niveau von Makronährstoffen in der Umwelt, wobei Stickstoff (N) und Phosphor (P) von besonderer Bedeutung sind. Nährstoff-Anreicherungen können unerwünschte Veränderungen in der Zusammensetzung der Arten und erhöhte Biomasseproduktion in aquatischen und terrestrischen Ökosystemen verursachen. Hohe Nährstoffkonzentrationen können zudem Trinkwasser-Vorräte verunreinigen. Erfasste überdüngende Emissionen werden über Charakterisierungsfaktoren gemäß ihrer Wirkintensität in kg Phosphat-Äquivalente umgerechnet.

- *Versauerungspotenzial [AP in kg SO₂-Äq.]*: Versauernde Emissionen wirken in vielfältiger Weise auf Boden, Grund- und Oberflächenwasser, biologische Organismen, Ökosysteme und Bauwerke. Wirkungsbeispiele sind etwa Fischsterben, Verschlechterung des Waldzustands oder Gesteinszerstörung an Gebäuden. Bedeutende versauernde Emissionen sind SO₂, NO_x und NH_x. Erfasste versauernde Emissionen in die Luft werden über Charakterisierungsfaktoren gemäß ihrer Wirkintensität in kg Schwefeldioxid-Äquivalente umgerechnet.
- *Stratosphärischer Ozonabbau [ODP in kg CFC-11-Äq.]*: Stratosphärischer Ozonabbau bezieht sich auf die Abnahme der stratosphärischen Ozonschicht als Folge anthropogener Emissionen. Dies verursacht einen erhöhten UV-B-Strahlungsanteil an der Erdoberfläche mit potenziell negativem Einfluss auf die Gesundheit von Menschen und Tieren, terrestrische und aquatische Ökosysteme, biochemische Kreisläufe und Materialien. Erfasste ozonabbauende Emissionen in die Luft werden über Charakterisierungsfaktoren gemäß ihrer Wirkintensität in kg-Äquivalente des FCKW Trichlorfluormethan (CFC-11) umgerechnet.
- *Sedimentäre Süßwasser-Ökotoxizität [FSETP in kg 1,4-DCB-Äq.]*: Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf das Sediment von Süßwasser-Ökosystemen. Erfasste toxische Emissionen in Luft, Wasser und Boden werden über Charakterisierungsfaktoren gemäß ihrer Wirkintensität in kg 1,4-Dichlorbenzol-Äquivalente umgerechnet.
- *Sedimentäre Seewasser-Ökotoxizität [MSETP in kg 1,4-DCB-Äq.]*: Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf das Sediment von Seewasser-Ökosystemen.
- *Aquatische Süßwasser-Ökotoxizität [FAETP in kg 1,4-DCB-Äq.]*: Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf aquatische Süßwasser-Ökosysteme.
- *Aquatische Seewasser-Ökotoxizität [MAETP in kg 1,4-DCB-Äq.]*: Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf aquatische Seewasser-Ökosysteme.
- *Boden-Ökotoxizität [TETP in kg 1,4-DCB-Äq.]*: Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf terrestrische Ökosysteme.
- *Photochemische Oxidation (Sommersmog) [POCP in kg Ethylen-Äq.]*: Photooxidantien, die wie Ozon unter Einfluss von Sonnenlicht auf bestimmte Luftschadstoffe entstehen, sind reaktive chemische Verbindungen. Ihre Bildung in der Troposphäre kann durch photochemische Oxidation von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und Kohlenmonoxid (CO) in der Gegenwart von Stickoxiden (NO_x) erfolgen. Sie können die menschliche Gesundheit und Ökosysteme gefährden und Feldfrüchte beschädigen. Erfasste Emissionen von VOC und CO in die Luft werden über Charakterisierungsfaktoren gemäß ihrer Wirkintensität in kg Ethylen-Äquivalente umgerechnet.

- *Klimawandel [GWP in kg CO₂-Äq.]*: Klimawandel wird hier definiert als die Auswirkungen anthropogener Emissionen (insbesondere CO₂, aber zum Beispiel auch CH₄ und N₂O) auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Dessen Beeinflussung hat wiederum nachteilige Effekte unter Anderem auf den Zustand von Ökosystemen, die menschliche Gesundheit und den materiellen Wohlstand. Klimawirksame Emissionen verstärken den Strahlungsantrieb und führen so zu einem Anstieg der Oberflächentemperaturen auf der Erde. Erfasste klimawirksame Emissionen in die Luft werden über Charakterisierungsfaktoren gemäß ihrer Wirkintensität in kg Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet.
- *Ionisierende Strahlung [DALY in Jahren]*: Der Indikator umfasst Auswirkungen der Freisetzung radioaktiver Substanzen sowie direkter Strahlenexposition, etwa durch Radionuklide in Baumaterialien. Als Maß für die gesundheitlichen Auswirkungen der Strahlung kommt das Konzept der „Disability Adjusted Life Years“ (DALY) zur Anwendung, das Sterblichkeit und Beeinträchtigung des beschwerdefreien Lebens als Folge radioaktiver Strahlung beschreibt. Erfasste Verursacher ionisierender Strahlung werden auf dieses Maß gemäß ihrer Wirkintensität (gemessen in Becquerel/kg) umgerechnet.
- *Humantoxizitätspotenzial [HTP in kg 1,4-DCB-Äq.]*: Diese Wirkungskategorie umfasst die Auswirkungen toxischer Substanzen, die in der Umwelt nachweisbar sind, auf die menschliche Gesundheit.
- *Geruch [in m³ Luft]*: Gerüche werden aus Sicht des Schutzbereichs der menschlichen Gesundheit dann problematisch, wenn eine vorliegende Konzentration eines Geruchsstoffes als unangenehm empfunden wird. Da diese Wahrnehmung individuell sehr unterschiedlich sein kann, werden an Hand des Odour Threshold Value (OTV) in kg/m³ Konzentrationen definiert, ab denen Geruchsentwicklungen von allen Individuen als Belästigung empfunden werden. Emissionen von Geruchsstoffen in kg werden zur Charakterisierung mit dem Reziprok ihres OTV multipliziert, um das bis zum OTV belastete Luftvolumen in m³ zu ermitteln.

Ressourcenindikatoren

- *Erschöpfung abiotischer Ressourcen [ADP in kg Antimon-Äq.]*: Abiotische Ressourcen sind natürliche Ressourcen der unbelebten Natur (inklusive Energie-Ressourcen) wie Eisenerz, Rohöl und Windenergie. Der Indikator erfasst die Extraktion von mineralischen Rohstoffen und fossilen Energieträgern. Auf Grundlage ihres Verhältnisses zwischen jährlicher Extraktion und Ressourcenpotenzial („Ultimate Reserves“) wird ihr Erschöpfungspotenzial ermittelt, und im Rahmen der Charakterisierung auf die Referenzressource Antimon umgerechnet. Der aggregierte Indikatorwert wird dann in kg Antimon-Äquivalenten angegeben.
- *Landverbrauch [in m²*Jahr]*: Der Indikator beschreibt den Verlust von Fläche als Ressource im Sinne eines temporären Ausschlusses konkurrierender Nutzungen. Er bezieht Flächenressourcen im Sinne von natürlichen Ressourcen und mensch-

gemachter Umwelt ein. Eine Charakterisierung findet nicht statt – alle Landnutzungstypen werden ungewichtet aggregiert.

Zu beachten ist, dass die wissenschaftliche Diskussion insbesondere um Indikatoren mit Bezug auf die Erschöpfung von Ressourcen und die Wirkungen toxischer Substanzen nicht abgeschlossen ist. Die der CML-Methode zu Grunde liegenden Bewertungsmodelle stellen deshalb nur eine von unterschiedlichen Möglichkeiten der Bewertung dieser Wirkungskategorien dar.

Ressourcenindikator von Ökobilanzen versus „Ökologischer Rucksack“

Die Auflistung der Indikatoren, die im Rahmen des gewählten LCIA-Systems berücksichtigt werden, zeigt die für Ökobilanz-Untersuchungen typische Fokussierung auf Mid-Points der Ursache-Wirkungs-Kette, also auf die Erfassung und Bewertung von Emissionen. Ressourcen-Bewertungen sind dagegen hier und im Rahmen anderer LCIA-Methoden nur von geringer Bedeutung. Einzige Ausnahme stellen hier die beiden Indikatoren „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ und „Landverbrauch“ dar, die Hinweise auf die Belastung von Energie-, Material- und Flächenressourcen durch das Produktsystem liefern, aber keine Aussage zum Ressourcenrucksack des Untersuchungsgegenstandes treffen. Dieser wird als Gesamtumfang abiotischer und biotischer Ressourcenentnahme dagegen beispielsweise durch die Indikatoren TMR (Total Material Requirement) auf volkswirtschaftlicher und MIPS (Material Input Per Service Unit) auf Produktebene ausgedrückt, die aber bisher in der Standardsoftware für die Ökobilanzierung nicht ausreichend verankert sind.

Dennoch stellt die im Rahmen der hier durchgeführten Ökobilanz erstellte Sachbilanz grundsätzlich eine geeignete Grundlage zur Durchführung von MIPS-Analysen dar: Ecoinvent-Prozesse und damit auch die aus ihrer Verwendung resultierenden Sachbilanzen weisen 284 Elementarflüsse der Kategorie „Ressource“ aus. Hierbei handelt es sich jeweils zur Hälfte um Angaben zu Landnutzungen und Landnutzungsänderungen einerseits und um materielle Ressourcenströme andererseits, wobei letztere als Grundlage zur Berechnung der Materialintensität nach dem MIPS-Konzept in Frage kommen. Die Beschreibung der Nomenklatur dieser Ressourcenströme in ecoinvent macht jedoch deutlich, dass insbesondere indirekte Materialinputs nur unvollständig berücksichtigt werden (vergleiche Tab. 3-4).

So beschreiben in der Sachbilanz ausgewiesenen Elementarflüsse von Metallen die Fördermengen des direkt genutzten Rohstoffes. Über die Materialbezeichnung lässt sich hieraus der Materialaufwand auf die geförderte Roherzmenge umrechnen. So wird für das Material „Aluminium, 24% in Bauxite, 11% in crude ore, in ground“ ein Aluminiumgehalt des Erzes von 11% angenommen, woraus sich je kg Fördermenge 9,1 kg Roherz ergeben. Zu weiteren Bestandteilen des in MIPS ausgewiesenen abiotischen Ressourcenverbrauchs, insbesondere zu Abschätzungen der jeweiligen Abraummenge der Rohstoffförderung, trifft ecoinvent dagegen keine Aussagen. Für die Förderung mineralischer Rohstoffe gilt dies in vergleichbarer Form.

Um auch indirekte Materialinputs eines mit Prozessdaten der ecoinvent-Datenbank beschriebenen Systems zu erfassen, ist es demnach erforderlich, für etwa 140 Ressourcenströme der ecoinvent-Datenbank (insbesondere Metalle und Mineralien) Dokumentationen der Entnahmeprozesse zu recherchieren und zu einem Wirkungsabschätzungssystem zusammenzufassen. Hinzu kommt, dass für vergesellschaftete Rohstoffe (Rohstoffe, die in Koppelproduktion gewonnen werden) Allokationsfragen geklärt werden müssen und MIPS-Werte teilweise sehr von der Beschaffenheit der betrachteten Vorkommen (zum Beispiel Ganglagerstätte oder Seifen) abhängen können.

Tab. 3-4: Erläuterung der Nomenklatur von elementaren Ressourcenströmen in ecoinvent

| Amount | Elementary Flow | Meaning of the flow |
|--------|---|---|
| 1 kg | Magnesite, 60% in crude ore, in ground | Extraction of 1 kg magnesite (MgCO_3 or 266 g magnesium) in 1.67 kg crude ore. |
| 1 kg | Aluminium, 24% in Bauxite, 11% in crude ore, in ground | Extraction of 1 kg aluminium in 4.17 kg bauxite, in 9.1 kg crude ore. |
| 1 kg | Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore, in ground | Extraction of Nickel from a Nickel-Copper mine with a Nickel (and Copper) content of 0.76% (each) in the crude ore. |

Quelle: ecoinvent Centre (2007:28)

Es sei daher ausdrücklich auf die Notwendigkeit hingewiesen, einen geeigneten Materialverbrauchs-Indikator für die Anwendung auf Ökobilanz-Datenbestände zu entwickeln, um sowohl ressourcen- als auch emissionsbezogene Aspekte der Umweltverträglichkeit eines Systems in einer integrierten Analyse mit Hilfe von LCA-Standardsoftware ausreichend zu berücksichtigen. Ansätze hierfür finden sich in Giegrich et al. (2006).

3.4 Auswertung

Eine ausführliche Auswertung der Ökobilanz-Untersuchung erfolgt in Kapitel 7.2. Sie beinhaltet die Darstellung relativer und absoluter Entwicklungen der berechneten Indikatoren des Wirkungsabschätzungssystems CML 2001 für alle im Rahmen dieser Untersuchung berücksichtigten Szenarien. Zusätzlich zu dem Ressourcenindikator der Ökobilanz wird in Kapitel 7.3 schließlich beispielhaft der Trade-off mit Hilfe von MIPS-Indikatoren bestimmt.

3.5 Kopplung von Umberto mit HEAT und exogenen Parameter-Tabellen

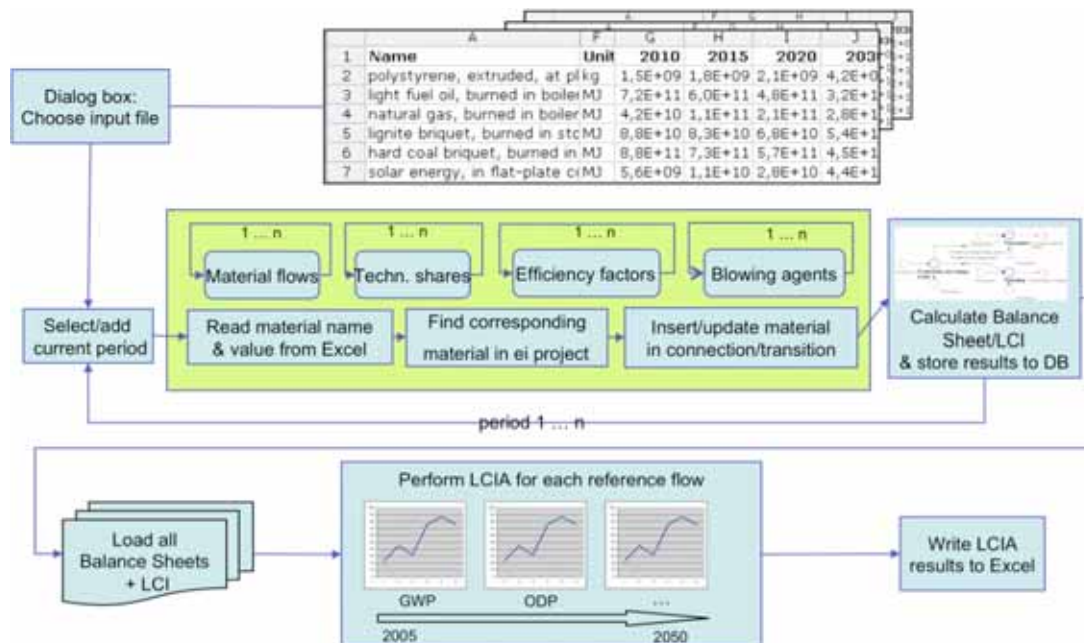
Im Stoffstrommodell wird eine Vielzahl an perioden- und szenariospezifischen Parametern berücksichtigt, die zunächst mit möglichst geringem manuellen Aufwand für jede Periode in das Modell übertragen werden müssen. Die technische Umsetzung dieses Datentransfers wird im Folgenden beschrieben. Umberto unterstützt die Microsoft-COM-Schnittstelle, welche den skriptgesteuerten Zugriff auf die Software und den Datenaustausch mit anderen Programmen ermöglicht. Zur Einspeisung in HEAT generierter oder exogen definierter Eingangsgrößen wird ein Python-Skript verwendet, welches

über die in der Umberto-COM-Dokumentation beschriebenen Interfaces, Methoden und Parameter den Zugriff auf alle Programmfunktionen ermöglicht.

Der Programmablauf wird zur Bilanzberechnung vom Python-Skript nach dem in Abb. 3-4 beschriebenen Schema gesteuert: Als Datenquellen dienen Datenblätter einer Excel-Datei je Szenario, in denen alle für die Bilanzberechnung in Umberto benötigten (periodenabhängigen) Eingangsgrößen in Zehnjahres-Schritten bis 2050 nach bestimmten Strukturvorgaben angeordnet sind. Durch den Anwender wird die Modellberechnung durch Auswahl der entsprechenden Quelldatei über ein Dialogfeld angestoßen. Die Daten werden dann periodenweise aus der Tabelle ausgelesen und zur weiteren Verarbeitung an Umberto übergeben. Alle Eingangsdaten für eine Periode werden nach einem im Skript festgelegten Schema im Modell als manuelle Flüsse (zum Beispiel Menge des Dämmstoffs XPS) oder innerhalb von Prozessbeschreibungen als Koeffizienten (zum Beispiel Wirkungsgrad der Kohlekraftwerke) festgelegt, bevor die Bilanzberechnung für die aktuelle Periode angestoßen wird und ihre Ergebnisse in der Datenbank gespeichert werden. Dieser Vorgang wird anschließend automatisch für alle weiteren Perioden wiederholt, bis mit Periode n das Ende der Tabelle erreicht wird. Der Fortschritt von Datentransfer und Berechnungen wird während der Ausführung des Skripts in einem Protokoll ausgegeben und kann so mitverfolgt werden.

Die auf diesem Weg erzeugten Sachbilanzen können anschließend aus der Datenbank geladen und (für alle Perioden gleichzeitig) einer Wirkungsabschätzung unterzogen werden, um Indikatorwerte für alle Zeitschritte zu erhalten und hieraus (je nach Erkenntnisinteresse) Ergebnisdiagramme für die zeitliche Entwicklung verschiedener Wirkungsindikatoren generieren zu können.

Abb. 3-4: Schematische Darstellung der Kopplung des Stoffstrommodells mit HEAT und exogenen Parametern



Quelle: Eigene Darstellung

4 Definition der MaRess-Szenarien (Modul 3)

4.1 Ausgangspunkt Policymix

Grundidee der geplanten Modellierung

Ursprüngliches Ziel der Szenarien-Modellierung war es, auf einem von den AP3, 4 und 12 identifizierten Policymix aufzusetzen und insbesondere ressourcenpolitische Maßnahmen in die Szenarien zu integrieren oder gezielt eigene Ressourcenszenarien zu entwickeln. Als methodische Grundlage stand dafür die aus der Energiemodellierung bewährte Vorgehensweise der Szenarienerstellung zur Verfügung. Deren zentrale Elemente sind

- *Zielorientierung*: Definieren eines Langfristziels, das sich aus einem oder mehreren Zielgrößen zusammen setzt – prominente Beispiele sind die seit Jahren erstellten Energieszenarien, die beispielsweise in der Variante E1 des Leitszenarios 2008 (BMU 2008) das Ziel einer 80-prozentigen Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 betrachten;
- *Szenarienfächer*: Entwickeln einer Schar von Langfrist-Szenarien, die Entwicklungspfade zum Erreichen der gesetzten Zielgrößen aufspannen oder zeigen, wie und in welchem Ausmaß die Ziele verfehlt werden. Solche Szenarien spannen meist einen Fächer zwischen niedriger Eingriffstiefe (business-as-usual Pfad) und hoher Eingriffstiefe (mit Auswirkungen bis hin zum Systemwechsel) auf.

Zur Entwicklung von Politikinstrumenten fanden mehrere Abstimmungsgespräche und gemeinsame Workshops zwischen den Modellierungs-Arbeitspaketen 5 (Quantitative und qualitative Analyse der ökonomischen Effekte einer forcierten Ressourceneffizienzstrategie) und 6 sowie den Politik-AP3, 4 und 12 statt (Abstimmungsworkshop mit AP1/3/4/5/12 am 12.03.2009; Nachfolge-Treffen mit AP3/5 am 17.08.2009 und mit AP4/5/12 am 01.09.2009). Dabei wurde diskutiert, wie die von den AP3, 4 und 12 entwickelte Instrumente, die im Folgenden dargestellt werden, in AS6.2 genutzt werden könnten.

Arbeitspaket 3 (Innovative Ressourcenpolitikansätze zur Gestaltung der Rahmenbedingungen)

Tab. 4-1 zeigt eine Übersicht der in AP3 entwickelten Instrumentenbündel sowie ihre Relevanz für die Stoffstrom-Modellierung.

Tab. 4-1: Instrumente aus AP3 und ihre Relevanz für AS6.2

| Instrumentenbündel | Instrumente | Relevanz für AS6.2 |
|--|--|---|
| Moderne Regulierung und hybride Governance | Smart Regulation: Dynamische Standards + technology Forcing | Nicht relevant |
| | Hybride Ansätze (Ordnungsrecht + Selbstregulierung) | |
| Sektorale Ansätze | Vereinbarung Materialeffizienz/Recycling (Recyclingquote für den Metallsektor) | Nicht relevant, da in AS6.2 nur Dämmmaterialien modelliert; indirekte Relevanz für Vorketten der Energieerzeugung, die hier jedoch nicht angepasst werden konnten; zudem fehlen quantifizierbare Werte bis 2050 |
| Ökonomisch-fiskalische Anreize | Differenzierte Mehrwertsteuer | Nicht relevant |
| | Baustoffbesteuerung | Nur Primärbaustoffe (Sand, Schlacken usw.) betrachtet; hier jedoch Fokus auf Dämmmaterialien benötigt |
| Innovationspolitische Instrumente | Umweltinnovationsnetzwerke | Nicht relevant |
| | Venture Capital | |
| | Leuchtturmprojekte | |
| Exportförderung | Capacity Building, Networking, Informationen über Zielmärkte | Nicht relevant |
| | Finanzierung und Risikoabsicherung, Vertriebsunterstützung | |

Quelle: Eigene Darstellung aufbauend auf Tabelle ohne Nummer aus Paper 3.1 (Bleischwitz et al. 2009:26)

Im Ergebnis kann keines der Instrumente aus AP3 für die Modellierung in AS6.2 genutzt werden. Das einzige Instrument, das (indirekt) relevant wäre, wäre die Baustoffsteuer. Sie könnte beispielsweise bewirken, dass zunehmend mehr Sekundärmaterialien verwendet würden. Im Rahmen der Modellierung in AS6.2 wäre dies für die Dämmmaterialien relevant. Da die Baustoffsteuer jedoch nur für Primärbaustoffe betrachtet wurde, kommt sie für AS6.2 nicht zum Tragen.

Arbeitspaket 4 (Innovative Ressourcenpolitikansätze auf Mikroebene)

Tab. 4-2 zeigt eine Übersicht der in AP4 entwickelten Instrumentenbündel sowie ihre Relevanz für die Stoffstrom-Modellierung.

Tab. 4-2: Instrumentenbündel aus AP4 und ihre Relevanz für AS6.2

| Bereich | Instrumentenbündel | Relevanz für AS6.2 |
|---|--|--------------------|
| Public Efficiency Awareness & Performance | Beratungs- und Netzwerkförderung | Nicht relevant |
| | Wettbewerbe und Preise | |
| | Akteursvernetzung | |
| | Kundenintegrierte Kooperation | |
| | Betriebliche Informationssysteme | |
| | Benchmarking / Best beziehungsweise Good Practices | |

| | | |
|--|---|----------------|
| | Nichtregierungsorganisation | |
| | Einrichtungen der externen Qualitätsprüfung | |
| | Standards | |
| | Bildung Fachkräfte und spezieller Akteure | |
| | Berufliche Bildungsförderung | |
| | Corporate Social Responsibility / Corporate Citizenship | |
| | Extern evaluierte und zertifizierte Managementsysteme | |
| | Kontakt- und Gesprächsarenen | |
| | Leitfäden für das Unternehmensgeschehen | |
| | Beratung / Coaching | |
| | Themenspezifische Kommunikation | |
| | Bildung Führungskräfte / Management | |
| Finanzwirtschaftliche Instrumente | Reporting von ressourcenbezogenen Informationen durch Unternehmen | Nicht relevant |
| | Finanzielle Anreizinstrumente | |
| | Regulierung des Risikomanagements von Finanzdienstleistern | |
| | Institutionsbezogene Berichtspflichten | |
| | Qualifikation von Finanzexperten | |
| | Institutionelle Verknüpfung Finanzsektors mit Nachhaltigkeitsforschung | |
| | Retail-Finanzprodukte | |
| Innovations- und Markteinführungsinstrumente | Raumordnung, Bauleitplanung | Nicht relevant |
| | Innovationsförderung, FuE-Förderung | |
| | Investitions-, Export-, Anreizförderung | |
| | Ranking | |
| | Wettbewerbe für Markteinführung | |
| | Zielsetzung auf diversen räumlichen Ebene | |
| | Innovationsindex Ressourceneffizienz | |
| | Leitfäden, Berechnungshilfen, Agenda-Setting | |
| | Innovationswerkstätten (Laborhäuser, Projekthäuser) | |
| | Erfindermessen / -preise, Kundenintegration | |
| | Nachfragebündelung, Road-Mapping | |
| | Innovation Agents, neue Geschäftsmodelle | |
| | Förderprogramme, Foresight-Prozesse, Innovationsradar, Technologieradar / Plattformen | |
| | Pilotprojekte | |
| | Demonstrationsvorhaben, Product Panels | |

Quelle: Eigene Darstellung aufbauend auf Übersicht Instrumentenbündel aus AP4 (Görlach et al. 2009)

Im Ergebnis kann keines der Instrumente aus AP4 für die Modellierung in AS6.2 genutzt werden.

Arbeitspaket 12 (Konsumenten- und kundennahe Ansätze zur Ressourceneffizienzsteigerung)

Tab. 4-3 zeigt eine Übersicht der in AP12 entwickelten Instrumente sowie ihre Relevanz für die Stoffstrom-Modellierung (angegeben sind nur diejenigen Instrumente, die in AP12 für eine Feinanalyse ausgewählt wurden).

Tab. 4-3: Instrumente aus AP12 und ihre Relevanz für AS6.2

| Ressourcenpolitik-Option | Relevanz für AS6.2 |
|---|---|
| Profilierung des Blauen Engels im Bereich des Ressourcenschutzes | Nicht relevant |
| Ressourceneffizienz-Beratung für sozial-benachteiligte Haushalte | Nicht relevant |
| Internet-/Web 2.0-basierte Verbraucherberatung zu Ressourceneffizienz | Nicht relevant |
| Ressourcenausweis für Gebäude | Relevant, allerdings Datenlage sehr dürrtig oder spekulativ; Ressourceneinsparpotenziale und -umsetzungspotenziale nur für den Zeitraum 2020-2029 spezifiziert (20%/7% im Gebäudebestand); fraglich, ob auf Dämmmaterialien anwendbar |

Quelle: Eigene Darstellung aufbauend auf Übersicht Instrumentenbündel aus AP12 (Scholl et al. 2009a,b)

Aufgrund der großen Unsicherheit hinsichtlich der anzusetzenden Werte wurde der Ressourcenausweis für Gebäude (das einzige eventuell in Frage kommende Instrument) in AS6.2 nicht weiter betrachtet.

Zusammenfassend kann keiner der von den Politik-AP identifizierten Ressourcenpolitik-Ansätze direkt auf den hier modellierten Bereich der Sanierung von Wohngebäuden angewendet werden. Es wurde deutlich, dass hinsichtlich der Verbindung der Szenarientwicklung und der Stoffstrommodellierung mit der Konkretisierung von wohnraum-spezifischen Instrumenten weiterer Forschungsbedarf besteht.

Aber selbst wenn quantifizierbare Instrumente vorlägen, bestände aus technischer Sicht die Herausforderung, sie in Stoffstrommodellen modellieren zu können: Bestehende Ressourcenindikatoren wie TMR oder MIPS können derzeit nicht in Stoffstrommodellen mit anschließender Umweltwirkungsanalyse verwendet werden, da es im Bereich der softwaregestützten Ökobilanzierung an der notwendigen Harmonisierung mangelt (siehe Kapitel 3.3). Die Integration von Ressourcenindikatoren in Ökobilanzen ergibt daher wie oben dargelegt einen weiteren wichtigen Forschungsansatz.

Alternativ gewählter Modellierungsansatz

Aufgrund der Schwierigkeiten, konkrete Ressourcenziele und Instrumente zu deren Erreichbarkeit zu definieren, wurde der Rückgriff auf bestehende klimapolitische Ziele und Szenarien vorgenommen. In gängigen Szenarien aus diesem Sektor, wie etwa der Variante E1 des Leitszenarios 2008 (BMU 2008) wird in der Regel eine Begrenzung

der energiebedingten CO₂-Emissionen in Deutschland um 40% bis zum Jahr 2020 gegenüber 1990 und um 80% bis zum Jahr 2050 modelliert. Diese Ziele werden in neuen Szenarien oft noch verschärft und liegen z.B. im Innovationsszenario nach Öko-Institut und Prognos (2009) bei -91% bis 2050. Auch ohne Einbezug konkreter Ressourcenziele sind diese Szenarien dennoch von hoher Relevanz für die in MaRess verfolgten Ziele:

- Durch den Energiebedarf in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr wird eine große Menge endlicher energetischer Ressourcen (Primärenergie) verbraucht, so dass eine Betrachtung dieser Sektoren nicht nur aus klimapolitischen, sondern ebenso aus ressourcenpolitischen (und sicherheitspolitischen) Gründen äußerst relevant erscheint;
- bisher existieren keine Abschätzungen über mögliche Trade-offs zwischen Energieeinsparung und gesamtem Rohstoffverbrauch, so dass die Kopplung eines Gebäude-Energiemodells mit einem Stoffstrommodell die Möglichkeit gibt, dies erstmals gezielt zu analysieren.

Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Kapitel die verwendeten und weiter entwickelten Energieszenarien beschrieben, die als Grundlage für entsprechende parallel entwickelte Szenarien im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ (den MaRess-Szenarien) dienen.

4.2 Narrative Beschreibung der MaRess-Szenarien

Zur Erstellung der MaRess-Szenarien wird wie oben beschrieben auf bestehende Energieszenarien zurückgegriffen, die um spezifische Festlegungen hinsichtlich des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“ ergänzt werden. Als Grundlage wurde die *Leitstudie 2008* des Bundesumweltministeriums ausgewählt, da sie zum Zeitpunkt der Szenarienerstellung (Herbst 2009) die einzige offizielle Studie eines Bundesministeriums über die zukünftige Entwicklung des Energiesystems in Deutschland war¹.

Basis der Leitstudie ist das zielorientierte *Leitszenario 2008*, das darlegt, wie die energiebedingten CO₂-Emissionen bis 2050 in Deutschland auf rund 20% des Werts von 1990 gesenkt werden können (BMU 2008). Neben dem Basisszenario enthält die *Leitstudie 2008* auch eine Szenariengruppe E („Effizienz“), die höhere Effizienz und einen stärkeren Ausbau der erneuerbaren Energien annimmt, ebenso wie eine Szenariengruppe D („Defizit“), die die Konsequenzen einer weniger erfolgreichen Effizienzpolitik abbildet.

Das *Leitszenario 2008* bildet die Zwischenziele der Bundesregierung für 2020 ab, die in Beschlüssen der Bundesregierung, einschlägigen Gesetzen und den Regelungen

¹ Inzwischen wurde die „Leitstudie 2009“ veröffentlicht, in der das zentrale „LEITSZENARIO“ fortgeschrieben wurde. Da die anderen Szenariengruppen nicht aktualisiert wurden, wurde für die MaRess-Szenarien die Version aus 2008 beibehalten. Die „Leitstudie 2010“ ist derzeit in Arbeit und könnte Basis für eine Fortschreibung der MaRess-Szenarien in einem Nachfolgeprojekt sein.

der EU-Kommission festgelegt wurden. Dies betrifft Festlegungen für die Reduktion der CO₂-Emissionen, die Steigerung der Energieproduktivität und den Beitrag der erneuerbaren Energien, die einen entsprechenden Strukturwandel in der Energieversorgung auslösen.

Zentrale Gestaltungselemente der verschiedenen Szenarien der *Leitstudie 2008* sind die aufeinander abgestimmten Teilstrategien „Substanzieller Ausbau erneuerbarer Energien“ sowie „deutlich erhöhte Nutzungseffizienz in allen Sektoren“ und „erhöhte Umwandlungseffizienz durch einen verstärkten Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und den Ersatz von Altkraftwerken durch effizientere Kraftwerke (KWK)“. In allen Szenarien wird von einem Ausstieg aus der Kernkraftnutzung ausgegangen. Ein möglicher Einstieg in die serienmäßige Nutzung von Technologien zur Abtrennung und Lagerung von Kohlendioxid (CCS) wird nicht berücksichtigt.

Im Folgenden wird erläutert, wie die MaRess-Szenarien auf der *Leitstudie 2008* aufbauen (siehe auch Tab. 4-4). Die Annahmen, die speziell zur Modellierung des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“ getroffen werden, werden in Kapitel 5 dargestellt.

Szenario MaRess BAU

Zur Darstellung, welche Beiträge das *Leitszenario 2008* für die Klimaschutz- und Ressourcenziele liefert, ist es sinnvoll, zunächst eine Referenzentwicklung zu modellieren. Da in der *Leitstudie 2008* zielorientierte Szenarien entwickelt wurden, denen keine solche Referenz-Entwicklung gegenübergestellt wurde, musste zunächst ein eigenes Business-As-Usual-Szenario (BAU) entwickelt werden. Hierfür wurde auf die Referenzszenarien der Energieprognose (IER et al. 2009) und der WWF-Studie „Modell Deutschland“ (Öko-Institut und prognos 2009) zurück gegriffen.

Szenario MaRess Leit-Minus

Das Szenario *MaRess Leit-Minus* entspricht dem *Defizitszenario D1* der *Leitstudie 2008*. Dabei wird einerseits angenommen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien wie geplant erfolgt, sich die erzeugte Menge an Strom und Wärme in absoluten Mengen gegenüber dem *Leitszenario 2008* also nicht verändert. Demgegenüber wird jedoch eine geringere Wirkung der Maßnahmenpakete zur Effizienzsteigerung und zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung angenommen. Dadurch erhöht sich die Energienachfrage, so dass der Anteil der erneuerbaren Energien relativ gesehen sinkt (in 2050 nur noch 36,7% Anteil am Primärenergieverbrauch gegenüber 52,1% im *Leitszenario*). Der Verbrauch der fossilen Energien sinkt in 2050 nur auf 6.535 PJ/a ab (*Leitszenario*: 4.223 PJ/a). Die energiebedingten CO₂-Emissionen können gegenüber 1990 bis 2020 nur um knapp 28%, bis 2050 nur um 61% (*Leitszenario*: minus 36% beziehungsweise minus 78%) reduziert werden.

Szenario MaRess Leit

Das Szenario *MaRess Leit* entspricht dem *Leitszenario 2008*, das bereits oben beschrieben wurde.

Szenario *MaRes Leit-Plus*

MaRes Leit-Plus unterscheidet sich von *MaRes Leit* dadurch, dass die Effizienzbestrebungen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ noch weiter *gesteigert* wurden, indem der Heizenergiebedarf weiter abgesenkt wurde. Die Zusammensetzung des Wärmemix wurde vereinfacht konstant gehalten, so dass sowohl fossile als auch erneuerbare Wärmeträger in absoluten Mengen sinken.

Tab. 4-4: Übersicht über die MaRes-Szenarien und ihre Annahmen zur Energieversorgung

| MaRes-Szenario | Ursprung | Beschreibung / Analogien | Ein-griffs-tiefe | CO ₂ -Reduktion in 2050 |
|-------------------|---|---|------------------|------------------------------------|
| <i>BAU</i> | | Ermittelt aus Referenzszenarien der WWF-Studie „Modell Deutschland“ und der Energieprognose Primärenergie-Produktivität: plus 2%/a | Niedrig | Nur bis 2030 vorhanden |
| <i>Leit-Minus</i> | Szenario D1 aus der Leitstudie 2008 (verminderte Effizienz) | <i>Erneuerbare Energien</i> für Strom und Wärme gleiche Höhe wie in Leitszenario. Primärenergie-Verbrauch 2050: minus 29% Primärenergie-Produktivität: plus 2,5%/a Wärmenachfrage 2050: minus 24% Anteil REN Wärme-Endenergie 2050: 32% Anteil REN Strom-Endenergie 2050: 78% Anteil REN gesamte Endenergie 2050: 40% | Mittel | - 61,1% |
| <i>Leit</i> | Leitszenario 2008 | Hohe Anforderungen an <i>Effizienz</i> und Einsatz <i>erneuerbarer Energien</i> : Primärenergie-Verbrauch 2050: minus 45% Primärenergie-Produktivität: plus 3%/a Wärmenachfrage 2050: minus 50% Anteil REN Wärme-Endenergie 2050: 48% Anteil REN Strom-Endenergie 2050: 87% Anteil REN gesamte Endenergie 2050: 52% Erdgasbedarf: ab 2020 deutlich sinkend | hoch | - 78,5% |
| <i>Leit-Plus</i> | Leitszenario 2008 mit erhöhter Effizienz im Wohnbereich | Der <i>Endenergieverbrauch der Wohnungen</i> aus dem Leitszenario 2008 wird weiter abgesenkt, um sehr hohe Effizienz abbilden zu können. | hoch | nicht gerechnet |

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Übergreifende Annahmen

Die allen Szenarien zugrunde liegenden ökonomischen und sonstigen Basisdaten (zum Beispiel Entwicklung der Bevölkerung, der Haushaltsgößen) wurden leicht angepasst. Insbesondere die ökonomischen Daten wurden aufgrund der Wirtschaftskrise nach unten korrigiert. Sowohl die Modellierung in *HEAT* als auch die Top-down Modellierung in AP5 basieren auf den gleichen angepassten Daten.

Die Energieszenarien selbst wurden jedoch nicht verändert, da dies einen nicht vertretbaren Aufwand bedeutet hätte. Für die Zwecke des AS6.2 hat dies jedoch auch keine Relevanz, da nicht die Modellierung von Energieszenarien im Vordergrund

stand, sondern mögliche Trade-offs zwischen Energieeinsparung und Ressourcenverbrauch analysiert werden sollten.

Aus den Energieszenarien wird für Modellierungszwecke in AS6.2 sowohl der jeweilige Wärmemix im Haushaltsbereich als auch der bundesweite, durchschnittliche Strommix verwendet (siehe Kapitel 5.2).

5 Einflussparameter des Modells (Modul 4)

5.1 Externe Parameter (szenarioübergreifende Eckdaten)

Unter den allgemeinen betrachteten, nichtenergetischen Treibergrößen sind Rahmenindikatoren zusammengefasst, die eine allgemeine wirtschaftliche oder gesellschaftliche Entwicklung widerspiegeln und für alle Szenarien gleich gelten, also nicht Bestandteil des quantitativen und qualitativen Untersuchungsgegenstandes sind. Sie dienen zur Verfestigung des Modellausschnitts im Kontext einer realen Abbildung. Zu ihnen gehören etwa die demographische Entwicklung und die damit einhergehende Wohnflächenentwicklung, die Entwicklung der Bauteilstandards selbst (da die Güte der jeweiligen Standards innerhalb der Szenarien nicht variiert werden, sondern nur deren Marktanteile) sowie die Wirkungen von flankierenden Maßnahmen auf die Sanierungsraten.

Treibergröße: Entwicklung der Wärmedämm-Standards (U-Werte)

Die Wärmedämm-Standards betreffen die Entwicklungen von Bauteilanforderungen an Neubauten sowie für die nachträgliche Bauteilsanierung von Gebäuden. Diese Treibergröße stellt die wichtigste Kerngröße der jeweiligen Szenarien dar, da sie Indikatoren für eine technische Entwicklung (Passivhaus) und der politischen Qualitäts-Standardisierung mittels Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen sind. Durch sie lassen sich technologische Effizienzverbesserungen ablesen sowie die ökonomischen Auswirkungen ermitteln (Einsparkosten). In Tab. 5-1 sind die wichtigsten Wärmeschutzverordnungen und -standards dargelegt, die in den jeweiligen MaRess-Szenarien zum Einsatz gekommen sind².

Treibergröße: Bevölkerung und Wohnflächen

Bevölkerungsentwicklung: Die Modellrechnungen des Statistischen Bundesamtes gehen von zwei Leitindikatoren für die Entwicklung der Bevölkerung bis zum Jahre 2050 aus: der *Lebenserwartung* (Niedrig/Mittel/Hoch) und dem *Wanderungssaldo* (Niedrig/Mittel/Hoch). Die jeweilige Entwicklung der demzufolge neun Varianten kann in Tab. 5-2 abgelesen werden.

Für die Szenarioberechnung wird von der mittleren, moderateren Entwicklung ausgegangen.

² Der Wärmedurchgangskoeffizient gibt im statischen Zustand eines geschlossenen Systems (also ohne äußere Einwirkung wie z. B. Wind) an, wie viel Wärme in einer bestimmten Zeit durch ein bestimmtes Volumen (1 m^3 , Würfel mit 1 m Kantenlänge) des Dämmstoffs bei einem bestimmten Temperaturgefälle (früher in K heute in U-Werten) durchdringt.

Tab. 5-1: U-Werte zur Einhaltung von Wärmeschutzverordnungen und -standards

| Bauteile | (1) | (2) | EnEV 2009 Anforderungen im Bestand (BAU) | Niedrig- Energie-Haus (HT' -15%) | HT'' -80% | Passiv- Haus |
|--|------|------|---|--|---------------|-----------------|
| Wärmedämmung U-Werte (W/m^2K) | | | | | | |
| * Dach | 0,22 | 0,2 | | $\leq 0,16$ | 0,14 | 0,1 |
| * Außenwände | 0,5 | 0,3 | 0,20;0,24 | 0,25 | 0,15 | 0,112 |
| * Keller | 0,5 | 0,35 | 0,28 | 0,29 | 0,12 | 0,12 |
| * Fenster | 1,8 | 1,4 | 0,35 1,3 | $\leq 1,2$ | < 1 | < 0,7 |
| Spezifische Gesamt/Mehrkosten €/m² | | | | | | |
| * Dach | | | | 31,89/10,05 | 36,55/14,71 | 45,64/23,80 |
| * Außenwände | | | | 96,75/41,75 | 103,57/48,57 | 108,69/53,69 |
| * Keller | | | | 29,86/11,71 | 33,00/14,85 | 51,85/33,70 |
| * Fenster | | | | 434,50/101,50 | 456,25/123,23 | 478,00/145,00 |
| (1) WSVO 1995 gültig bis 31.01.2002 | | | | | | |
| (2) EnEV2002 – 2007; Kostenangaben gegliedert nach Gesamtkosten/Mehrkosten | | | | | | |

Quelle: Lehmann und Stanetzkyf (2001); Ecofys (2007); EnEV-Novelle – Anlage I (2008); Wuppertal Institut (2008); Eigene Berechnungen

Tab. 5-2: Entwicklung der Bevölkerung Deutschlands bis 2050

| Varianten | | Stützjahre | | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Lebens- erwartung | Wanderungs- Saldo | 2001 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Niedrig | Niedrig | 82,4 | 82 | 80 | 76,7 | 72,2 | 67,1 |
| Niedrig | Mittel | 82,4 | 82,9 | 82,2 | 80,3 | 77,3 | 73,6 |
| Niedrig | Hoch | 82,4 | 82,9 | 83,3 | 82,6 | 80,8 | 78,5 |
| Mittel | Niedrig | 82,4 | 82,2 | 80,6 | 77,6 | 73,4 | 68,5 |
| Mittel | Mittel | 82,4 | 83,1 | 82,8 | 81,2 | 78,5 | 75,1 |
| Mittel | Hoch | 82,4 | 83,1 | 82,8 | 81,2 | 78,5 | 75,1 |
| Hoch | Niedrig | 82,4 | 83,1 | 83,9 | 83,6 | 82,1 | 80 |
| Hoch | Mittel | 82,4 | 82,2 | 80,8 | 78 | 74,2 | 69,7 |
| Hoch | Hoch | 82,4 | 83,1 | 82,9 | 81,6 | 79,3 | 76,3 |
| Alle Angaben in Mio. | | | | | | | |

Quelle: Statistisches Bundesamt (2006)

Entwicklung der Wohnflächen: Die Entwicklung der Wohnfläche ist eine resultierende Größe, die aus der Entwicklung der Einkommensverhältnisse, sowie der daraus entstehenden Komfortansprüche entsteht.

Expertisen rechnen mit einer stetigen Steigerung der Wohnflächen von 7 - 10 m² pro Person und Dekade (empirica (2001), Bartholmai und Melzer (1993), Hake et al. (1999). Das heißt, der bislang erreichte, statistische Durchschnittswert von rund 40 m² wird sich bis zum Jahr 2050 fast verdoppeln. Bei Betrachtung der historischen Zahlenreihe 2002 – 2005 ist aber schon eine moderatere Entwicklung ersichtlich. Bei Annahme der mittleren Bevölkerungsentwicklung des Statistischen Bundesamtes gehen wir für die weiteren Szenarien von folgenden Bevölkerungsparametern aus (vergleiche Tab. 5-2 und Tab. 5-3).

Tab. 5-3: Entwicklungen der Wohnflächen pro Person

| | 1980 | 1990 | 2002 | 2005 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------|-------------------|------|------|------|------------------|------|------|------|------|
| | Historische Werte | | | | Szenarioannahmen | | | | |
| m ² /Kopf | 32,6 | 36,4 | 40,1 | 42,9 | 45,6 | 50,8 | 55,9 | 60,8 | 63,6 |

Quelle: Statistisches Bundesamt (2006); eigene Modellrechnungen

Bei Berücksichtigung der Entwicklungen für den Neubau sowie für die Wanderungsbewegung zwischen Alten und Neuen Bundesländern ergibt sich die in Tab. 5-3 aufgezeigte Wohnflächenentwicklung.

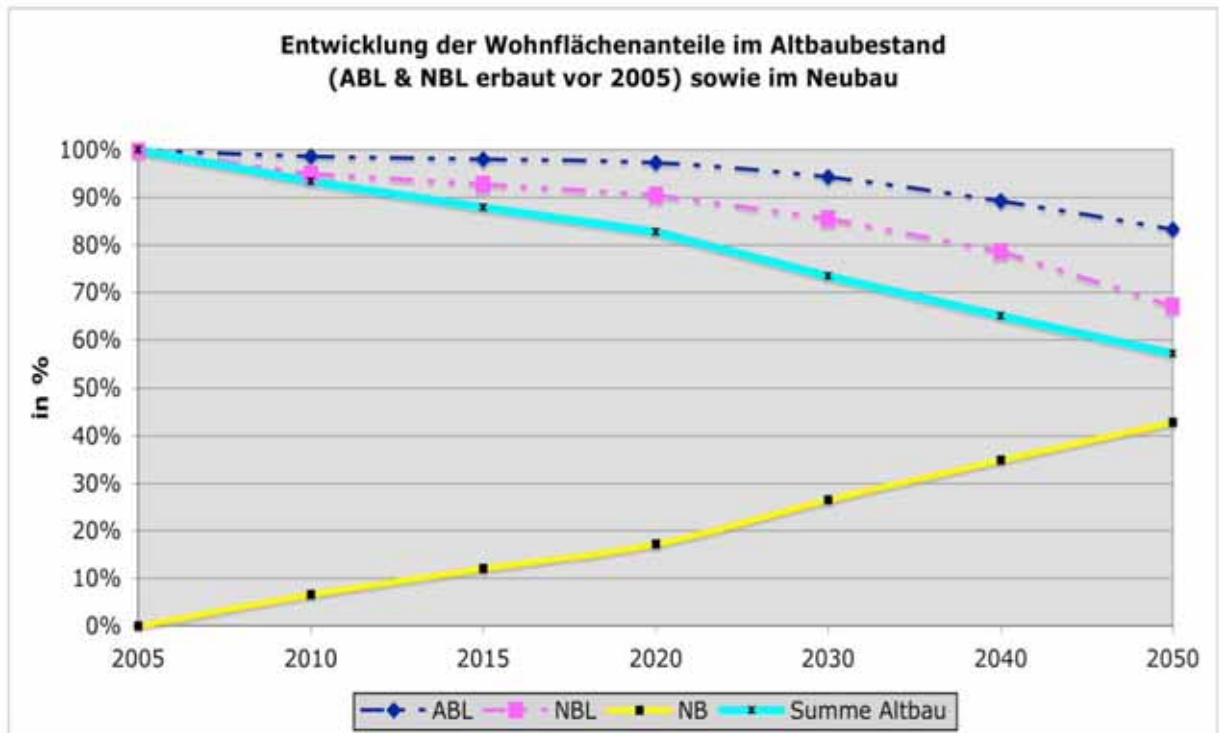
Tab. 5-4: Entwicklung der Wohnungsbestände

| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ABL | 2.754.661 | 2.718.336 | 2.699.236 | 2.680.136 | 2.598.136 | 2.459.136 | 2.292.906 |
| NBL | 546.672 | 518.882 | 506.892 | 494.902 | 467.877 | 429.964 | 367.243 |
| Neubau ^{*)} | - | 228.000 | 441.000 | 660.000 | 1.106.000 | 1.552.000 | 1.998.000 |
| Summe | 3.301.333 | 3.465.218 | 3.647.128 | 3.835.038 | 4.172.012 | 4.441.099 | 4.658.148 |
| Alle Angaben in 1.000 m ² | | | | | | | |
| ^{*)} Baubestände mit Fertigstellung nach dem Jahr 2002 | | | | | | | |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Die Entwicklung des Gesamt-Baubestandes lässt sich aus den teilweise voneinander abhängigen Teilentwicklungen ablesen (Tab. 5-4). Im Wesentlichen sind durch die vorgegebene demographische Entwicklung in den Modellberechnungen der aus der Vergangenheit abgeleitete Abriss und der daraus resultierende Neubaubedarf berechnet worden. In Abb. 5-1 ist die Entwicklung des Baubestandes nach Alten und Neuen Bundesländern sowie dem Neubaubedarf dargestellt.

Abb. 5-1: Entwicklung der Wohnflächenanteile von Alt- und Neubauten



Quelle: Eigene Modellrechnungen

5.2 Energetische Parameter

5.2.1 Strommix

Für alle MaRes-Szenarien wurden Annahmen zur Entwicklung des Strommixes getroffen, der im Stoffstrommodell dem direkten Stromverbrauch der Herstellung von Dämmstoffen sowie der Nutzung von Strom zu Heizzwecken zu Grunde gelegt wird.

Der Strommix jedes Szenarios wird im Folgenden an Hand von Abbildungen erläutert, die verschiedene mögliche Entwicklungen der prozentualen Anteile verschiedener Technologien an der Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 aufzeigen. Die Annahmen zur Stromerzeugung basieren dabei – wie in Kapitel 4.2 beschrieben – überwiegend auf Energieszenarien aus der *Leitstudie 2008* (BMU 2008).

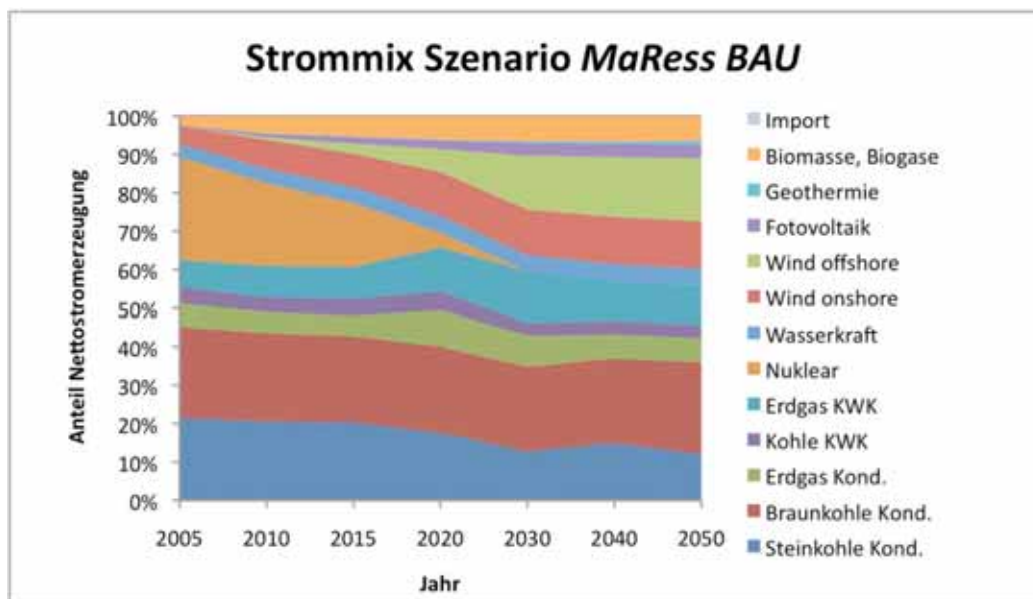
Einzige Ausnahme bildet das Szenario *MaRes BAU*, das aus anderen Quellen zusammen gestellt werden musste. Da die Stromerzeugung dort nur in Nettowerten ausgewiesen ist, wurde dieser Strommix abweichend nicht aus der Brutto-, sondern aus der Nettostromerzeugung abgeleitet. Da als Inputgröße für das Stoffstrommodell allerdings nur prozentuale Anteile, nicht aber absolute Erzeugungsmengen von Bedeutung sind, erscheinen die hieraus resultierenden Abweichungen durch unterschiedlich hohe Eigenverbräuche der Kraftwerke vernachlässigbar.

Szenario *MaRes BAU*

Der im Szenario *MaRes BAU* auf Grundlage der Netto-Stromerzeugung angenommene Strommix ist in Abb. 5-2 dargestellt. Die Kurvenverläufe entsprechen dabei bis 2030 im Grundsatz dem Referenzszenario der Energieprognose 2009 (IER et al. 2009:84,218), wobei zur besseren Vergleichbarkeit einige der dort aufgeführten Erzeugungstechnologien zu Gruppen zusammengefasst wurden. Abweichend bleiben Netto-stromimporte unberücksichtigt, die von der Energieprognose 2009 ab 2015 erwartet, aber nicht näher definiert werden. Der für 2030 angenommene CCS-Anteil an der Braunkohle wurde zudem als konventionelle Braunkohle-Verstromung modelliert. Auf Grund fehlender Angaben zur weiteren Entwicklung nach 2030 wurde diese analog zur relativen Entwicklung im Referenzszenario der Studie WWF Modell Deutschland 2050 (Öko-Institut und prognos 2009:335) bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben.

Der Strommix im Szenario *MaRes BAU* ist gekennzeichnet durch einen nur moderaten Rückgang der Erzeugung von Steinkohle-Kondensationsstrom und weitgehend konstanten Anteilen der weiteren fossilen Stromquellen, wobei Erdgas-KWK mit leicht steigenden Anteilen eine Ausnahme darstellt. Insgesamt ist das Absinken der nicht-regenerativen Stromerzeugung in diesem Szenario von 89% auf 56% im Zeitraum von 2005 bis 2050 fast ausschließlich im Ausstieg aus der Kernkraft-Nutzung begründet. Dieser wird im Wesentlichen kompensiert durch den Ausbau der Onshore- und insbesondere der Offshore-Windkraft. Die Anteile weiterer Erneuerbarer wie Wasserkraft und Biomasse bleiben konstant oder erreichen im Fall der Geothermie keine relevante Größenordnung (0,9%). Importe erneuerbarer Energieträger werden nicht angenommen.

Abb. 5-2: Strommix im Szenario *MaRes BAU*



Quelle: Eigene Darstellung nach IER et al. (2009) und Öko-Institut und prognos (2009)

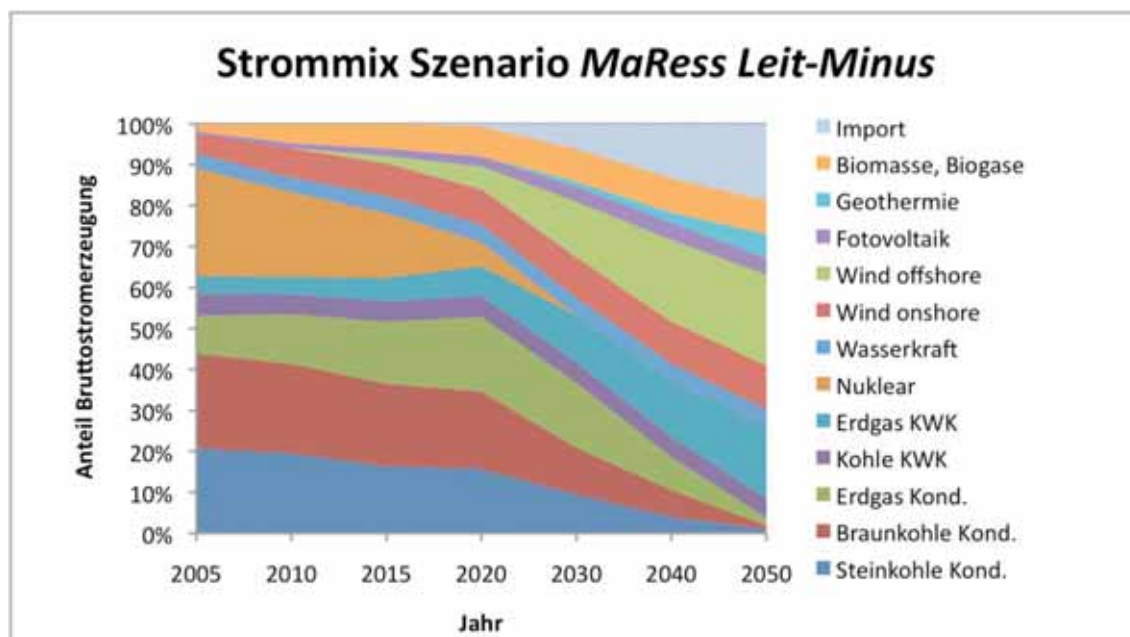
Auf Grundlage dieses Strommixes und der Abbildung der Stromerzeugung im Stoffstrommodell ergeben sich nach eigenen Berechnungen für die Bereitstellung von Strom auf der Niederspannungsebene spezifische Emissionsminderungen der Prozesskette von etwa 19% oder 128 g CO₂-Äquivalenten pro kWh Strom in 2050 gegenüber 2005.

Szenario *MaRes Leit-Minus*

Der Strommix des Szenarios *MaRes Leit-Minus* basiert auf der in Abb. 5-3 dargestellten Brutto-Stromerzeugung. Datengrundlage sind hier die Annahmen aus dem Defizitszenario D1 der Leitstudie 2008. Der Ausbau der erneuerbaren Energien entspricht dabei dem Leitszenario derselben Studie (BMU 2008:79,162), das auch für das Szenario *MaRes Leit-Plus* verwendet wurde und deshalb Gegenstand des nächsten Abschnittes ist. Auf Grund verringerter Wirksamkeit von Effizienzmaßnahmen wird hier allerdings eine höhere Bruttostromerzeugung angenommen.

Aus der Annahme, dass die absoluten Erzeugungsmengen aus erneuerbaren Quellen im Vergleich zum Leitszenario unverändert bleiben und der Mehrbedarf anteilmäßig auf alle fossilen Energieträger verteilt wird, ergibt sich die dargestellte Entwicklung des Strommixes für das Szenario *MaRes Leit-Minus* (BMU 2008:189). Hieraus ergibt sich zusätzlich der Effekt, dass die Tendenz der Entwicklung des Strommixes im Szenario *MaRes Leit-Minus* der des Szenarios *MaRes Leit-Plus* entspricht, während sich die Verhältnisse an der Bruttostrom-Erzeugung geringfügig zugunsten der fossilen Energieträger verschieben: Während diese in 2050 noch einen Anteil von 26% aufweisen, wird im Mix ein Erneuerbarer Anteil von 74% erwartet.

Abb. 5-3: Strommix im Szenario *MaRes Leit-Minus*



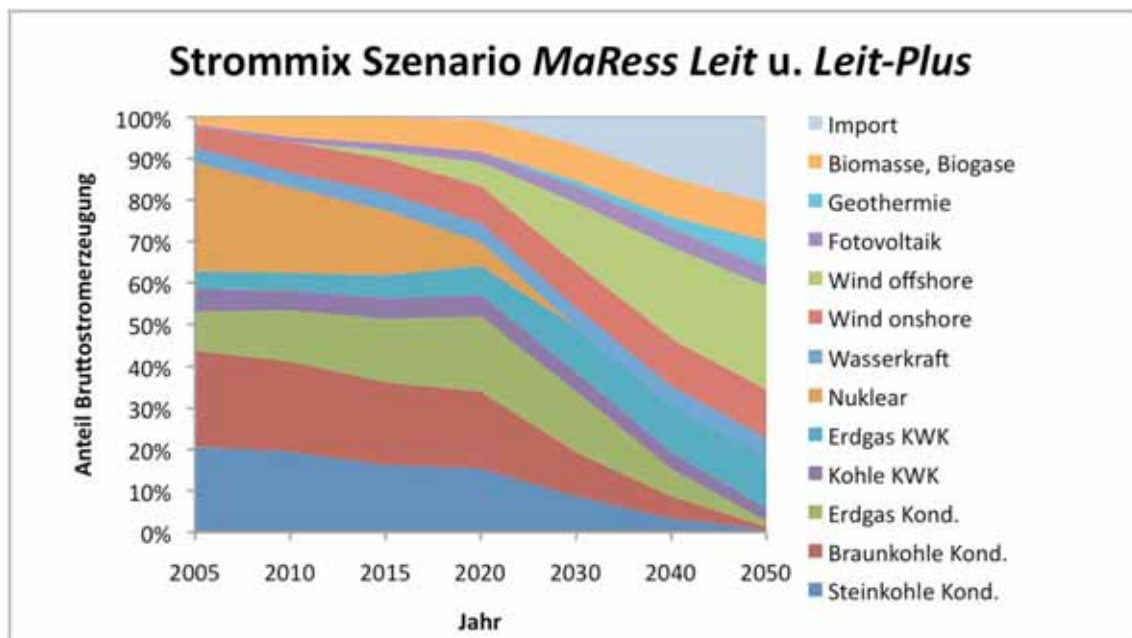
Quelle: Eigene Darstellung nach BMU 2008

Für die Bereitstellung von Strom auf der Niederspannungsebene ergeben sich hieraus spezifische Emissionsminderungen der Prozesskette von etwa 62% oder 424 g CO₂-Äquivalenten pro kWh Strom in 2050 gegenüber 2005.

Szenario *MaRes Leit*

Abb. 5-4 zeigt die Annahmen zur Brutto-Stromerzeugung für den Strommix im Szenario *MaRes Leit*, die weitestgehend unverändert aus dem Leitszenario der Leitstudie 2008 übernommen wurden (BMU 2008:79,162). Detaillierte Angaben der Leitstudie zur Stromerzeugung in Kondensations- und KWK-Anlagen wurden genutzt, um die Brutto-Stromerzeugung nach diesen Kraftwerksarten weiter zu differenzieren (BMU 2008:81).

Abb. 5-4: Strommix in den Szenarien *MaRes Leit* und *MaRes Leit-Plus*



Quelle: Eigene Darstellung nach BMU (2008)

Der Strommix im Szenario *MaRes Leit* zeichnet sich durch einen erheblichen Rückgang der fossilen Stromerzeugung auf etwa 18% in 2050 ab, die zudem überwiegend aus KWK-Anlagen stammt. Unter den nicht-regenerativen Energieträgern nimmt daher im Zeitverlauf von 2005 bis 2050 nur der Anteil des in Kraft-Wärme-Kopplung genutzten Erdgases zu, während die restliche fossile Erzeugung (inklusive Kernenergie) vom Basisjahr an oder spätestens ab 2020 zurückgeht. Schon im Jahr 2030 erreichen die Erneuerbaren Energieträger einen Anteil von 50% an der Stromerzeugung und werden damit im Stromsektor zur wichtigsten Energiequelle. Ihre Bedeutung nimmt bis zum Jahr 2050 weiter zu – die Erneuerbaren dominieren dann die Stromversorgung mit einem Anteil von 82% an der Bruttostromerzeugung. Diese deutliche Steigerung wird insbesondere erreicht durch den Ausbau der Offshore-Windkraft an den deutschen Küsten und Importe über ein europäisches HGÜ-Verbundnetz, das Strom aus solarthermischen Kraftwerken und weiteren Offshore-Windkraftanlagen liefert. Während

sich bei der Wasserkraft nur noch geringfügige Ausbaupotenziale zeigen, nimmt auch die Bedeutung der Onshore-Windkraft, Fotovoltaik, Geothermie- und Biomasse-Nutzung weiter zu.

Für die Bereitstellung von Strom auf der Niederspannungsebene ergeben sich hieraus spezifische Emissionsminderungen der Prozesskette von etwa 70% oder 483 g CO₂-Äquivalenten pro kWh Strom in 2050 gegenüber 2005.

Szenario *MaRess Leit-Plus*

Der Strommix im Szenario *MaRess Leit-Plus* ist identisch mit den Strommix-Vorgaben aus *MaRess Leit* und stimmt daher mit der bereits zuvor beschriebenen Abb. 5-4 überein. Im Vergleich zu *MaRess Leit* ist hier aber der Heizenergie- und damit auch der Stromverbrauch elektrischer Heizungen weiter abgesenkt.

5.2.2 Wärmemix

Der in den MaRess-Szenarien eingesetzte Wärmemix, das heißt die Verteilung der Heizungs- und Warmwasser-Erzeugungsanlagen auf Energieträger, erfolgte lediglich durch die zu erreichenden Potenziale der erneuerbaren Energieträger sowie durch den Wandel, der durch den Ab- und Zugang von abgerissenen und neugebauten Wohngebäuden entsteht. Eine eigenständige, durch politische Maßnahmen forcierte Heizungsanlagenerneuerung wurde hinsichtlich der zu analysierten Wechselwirkungen von Dämmstoffen nicht berücksichtigt, um die *direkten* Wirkungszusammenhänge nicht zu verschleiern. Hinsichtlich der *indirekten* Wirkungszusammenhänge von Wärmedämmung, zunehmender Forcierung der erneuerbaren Energien (zunehmende Dezentralität) und der Ökobilanzierung von Heizungsanlagen besteht zur Zeit noch erheblicher Forschungsbedarf.

In den folgenden Teilabschnitten werden die jeweiligen Energieträger der eingesetzten Heizungsanlagen für die MaRess-Szenarien dargestellt.

Szenario *MaRess BAU*

Im Szenario *MaRess Bau* sind lediglich die derzeitigen entsprechenden Trends fortgeführt. Dies bedeutet im Wesentlichen inter-technologische Substitution von Niedertemperaturkesseln durch Brennwert-Technologie sowie Ausbau der Strom-Wärmepumpen im Neubaubereich.

Abb. 5-5: Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario *MaRes BAU*

| Endenergiebilanz (RW + WW) | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Fernwärme | 6,7% | 7,3% | 7,8% | 8,1% | 7,4% | 8,5% | 10,2% |
| Öl | 38,2% | 37,4% | 37,3% | 36,3% | 29,8% | 26,4% | 22,3% |
| Gas | 46,3% | 47,0% | 47,0% | 47,2% | 54,3% | 57,7% | 59,8% |
| Kohle | 1,7% | 1,2% | 0,7% | 0,7% | 0,7% | 0,7% | 0,6% |
| Strom | 5,7% | 5,5% | 5,6% | 5,8% | 5,7% | 4,2% | 3,4% |
| Solar | 0,2% | 0,4% | 0,6% | 0,7% | 0,9% | 1,6% | 2,6% |
| Biomasse | 1,1% | 1,2% | 1,1% | 1,1% | 1,0% | 1,0% | 1,0% |
| | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

© Wuppertal Institut, MaRes BAU

Quelle: Eigene Modellberechnungen

Szenario *MaRes Leit-Minus*

Das Szenario *MaRes Leit-Minus* orientiert sich weitgehend an dem Szenario *MaRes Bau*. Lediglich durch die leichte Verschärfung der Wärmedämmstandards (vergleiche die jeweiligen Wärmeschutzverordnungen und weiterführende Annahmen in Tab. 5-1) kommt es auch zu Veränderungen in der Heizungsverteilung.

Abb. 5-6: Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario *MaRes Leit-Minus*

| Endenergiebilanz (RW + WW) | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Fernwärme | 6,7% | 9,0% | 10,2% | 11,5% | 13,5% | 15,7% | 19,0% |
| Öl | 38,2% | 33,6% | 30,0% | 27,0% | 19,4% | 13,3% | 7,4% |
| Gas | 46,3% | 47,0% | 46,8% | 47,3% | 51,8% | 54,1% | 54,0% |
| Kohle | 1,7% | 0,9% | 0,5% | 0,5% | 0,2% | 0,1% | 0,1% |
| Strom | 5,7% | 6,8% | 9,3% | 9,9% | 10,1% | 10,9% | 12,1% |
| Solar | 0,2% | 0,3% | 0,3% | 0,6% | 1,2% | 2,0% | 3,1% |
| Biomasse | 1,1% | 2,3% | 2,8% | 3,3% | 3,8% | 4,0% | 4,4% |
| | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

© Wuppertal Institut, MaRes-Leit Minus

Quelle: Eigene Modellberechnungen

Szenario *MaRes Leit*

Im Szenario *MaRes Leit* kommt es zu zwei wesentlichen Dynamiken, die auf die Heizungsanlagenverteilung Einfluss nehmen: einmal das hohe Einsparpotenzial, das durch die Wärmedämmung erzielt worden ist, und zum anderen die Vorgaben des erneuerbaren Energie-Einsatzes zur Deckung des Heizenergiebedarfes.

Abb. 5-7: Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario *MaRes Leit*

| Endenergiebilanz (RW + WW) | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Fernwärme | 6,7% | 9,2% | 10,4% | 13,2% | 16,9% | 21,2% | 28,0% |
| Öl | 38,2% | 33,9% | 30,6% | 26,4% | 19,7% | 15,2% | 9,9% |
| Gas | 46,3% | 47,1% | 47,1% | 46,8% | 49,0% | 46,5% | 41,0% |
| Kohle | 1,7% | 0,4% | 0,4% | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,1% |
| Strom | 5,7% | 6,8% | 7,9% | 6,9% | 5,7% | 5,5% | 4,8% |
| Solar | 0,2% | 0,3% | 0,6% | 1,5% | 2,7% | 4,8% | 8,0% |
| Biomasse | 1,1% | 2,4% | 2,9% | 5,0% | 6,0% | 6,8% | 8,1% |
| | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| © Wuppertal Institut, MaRes Leit | | | | | | | |

Quelle: Eigene Modellberechnungen

Szenario *MaRes Leit-Plus*

Die oben aufgeführten Effekte des Szenarios *MaRes Leit* werden im Szenario *MaRes Leit-Plus* weiter verstärkt. Zum einen ist der erzielte Wärmedämmstandard weiter erhöht und deren Umsetzungsraten im Szenariohorizont fast ausgeschöpft worden. Ferner sind die absoluten Potenziale der erneuerbaren Energien vom Szenario *MaRes Leit* übertragen worden, was eine zusätzliche Substitutionsdynamik auslöst.

Abb. 5-8: Einsatz der Heizungsanlagen nach Energieträgern im Szenario *MaRes Leit-Plus*

| Endenergiebilanz (RW + WW) | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Fernwärme | 6,7% | 9,4% | 11,3% | 15,1% | 20,9% | 29,2% | 46,4% |
| Öl | 38,2% | 32,8% | 30,0% | 24,8% | 16,9% | 9,2% | 2,5% |
| Gas | 46,3% | 47,8% | 46,8% | 46,0% | 46,7% | 42,6% | 25,0% |
| Kohle | 1,7% | 0,4% | 0,4% | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,0% |
| Strom | 5,7% | 6,7% | 8,1% | 7,4% | 6,0% | 5,5% | 4,5% |
| Solar | 0,2% | 0,3% | 0,3% | 0,9% | 2,3% | 4,5% | 9,0% |
| Biomasse | 1,1% | 2,4% | 3,1% | 5,5% | 7,1% | 8,9% | 12,7% |
| | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| © Wuppertal Institut, MaRes-Leit Plus | | | | | | | |

Quelle: Eigene Modellberechnungen

5.2.3 Brennstoffausnutzung fossiler Kraftwerke

In der Abbildung der Strombereitstellung im Stoffstrommodell besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Umwandlungswirkungsgrade fossiler Kondensationskraftwerke als Quotient aus Bruttostromerzeugung und Energieträgereinsatz zu definieren. Die getroffenen Annahmen sind für alle MaRes-Szenarien identisch und können Tab. 5-5 entnommen werden. Die Angaben basieren bis zum Jahr 2030 auf Ergebnissen aus EWI und Prognos (2005), ergänzt um eine konstante Fortschreibung bis 2050.

Tab. 5-5: Durchschnittliche Brennstoffausnutzung im jeweiligen Bestand fossiler Kondensationskraftwerke

| Brennstoff und Kraftwerkstyp | Land | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Steinkohle, in Kondensationskraftwerk | DE | 41,1 | 41,5 | 42,2 | 43,3 | 48,0 | 48,0 | 48,0 |
| Braunkohle, in Kondensationskraftwerk | DE | 38,8 | 40,1 | 41,1 | 42,6 | 43,4 | 43,4 | 43,4 |
| Erdgas, in Kondensationskraftwerk | DE | 49,5 | 49,4 | 52,1 | 56,9 | 60,2 | 60,2 | 60,2 |
| Alle Angaben in % | | | | | | | | |

Quelle: EWl und Prognos (2005) und eigene Fortschreibung

Für weitere Kraftwerke und Brennstoffe wurden keine variablen Energieträgerausnutzungsgrade implementiert. Entsprechende statische Faktoren sind implizit in den verwendeten Prozessmodulen der ecoinvent-Datenbank enthalten.

5.3 Gebäudeparameter (Szenarienannahmen in *HEAT*)

Neben den oben beschriebenen Annahmen, die die Energieszenarien direkt betreffen, wurden für jedes MaRess-Szenario weitere Annahmen zur Modellierung der jeweiligen Energieverbräuche im Wohnsektor getroffen, die im Folgenden beschrieben werden.

Szenario *MaRess BAU*

Innerhalb des Szenarios *MaRess BAU* bestehen spezifische Zielvorgaben nur insofern, als dass einer geringen Verschärfung bis zum Jahr 2020 der derzeit (Stand 02.2009) geltenden ENEC um abzüglich 15% auf den HT'-Wert (HT = baukörperbezogener mittlerer Transmissionswärme-Kennwert) vorgenommen wurde. Auch bis zum Jahr 2050 werden lediglich Effizienzmaßnahmen umgesetzt, die im Bereich des Trendsparens liegen.

Szenario *MaRess Leit-Minus*

Auch im Szenario *MaRess Leit-Minus* werden keine konkreten Klimaschutzvorgaben gemacht. Allerdings wird unterstellt, dass gegenüber Trendbedingungen in deutlich erhöhtem Umfang Effizienztechniken (sowohl auf der Nachfrageseite als Wärmedämmsysteme als auch auf Angebotsseite als „technisch-verbessertes“ Heizungssystem differenzierbare Effizienztechnik) zur Anwendung kommen. Als erweiterter Eingriff kommen zusätzlich zu den Effizienzmaßnahmen Maßnahmen im Bereich der Erneuerbaren Energien zum Einsatz. Zum anderen werden die Bedingungen zur Umsetzung wärmetechnischer Maßnahmen erweitert, so dass es zu einer leichten Zunahme der Umsetzungsraten kommt (vergleiche Tab. 5-7).

Szenario *MaRess Leit*

Im darauf aufbauenden Szenario *MaRess Leit* wird schließlich ein Zukunftspfad vorgegeben, der die maßgeblichen Ziele einer nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems erfüllt. Dies gilt insbesondere für die Verminderung der Treibhausgasemissionen (Minderung der CO₂-Emissionen um 80% bis 2050 gegenüber 1990) als Leitziel. Kon-

kret bedeutet dies eine Reduzierung von HT' um 80% für den *Altbau* und einer Passivhausvorgabe für den *Neubau* ab dem Jahr 2020.

Szenario *MaRes Leit-Plus*

Um die jeweiligen kombinierten Effekte der Szenarien auf ihre Einzelwirkungen zu untersuchen, bietet es sich an, innerhalb so genannter Sensitivitätsrechnungen Einzeleffekte zu isolieren, um deren Einzelwirkungen gegenüber den anderen abzuschätzen. Die MaRes-Szenarien sind daher um eine weitere Variante erweitert worden: Da die Potenziale der erneuerbaren Energien im Szenario *MaRes Leit* technologisch und infrastrukturell im Energiesystem umgesetzt sind, bietet es sich an, diese absoluten Mengen auch in einem verschärften Szenario mit reduziertem Heizenergiebedarf zu verwenden.

Tab. 5-6: Mix aus erneuerbaren Energien zur Deckung des Raumwärmebedarfes im Szenario *MaRes Leit-Plus* (mit entsprechenden Potenzialen aus dem Szenario *MaRes Leit*)

| Aufteilung der Regenerativen Energien & (konventionelle) Fernwärme | | | | | | | |
|--|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| im Szenario: | <i>High-Potential & Leitstudie</i> | | | | | | |
| in PJ | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Nah-/Fernwärme | 161,49 | 198,67 | 207,55 | 247,65 | 280,78 | 303,27 | 325,76 |
| * darunter: konvent. FW | 160,81 | 143,74 | 137,56 | 115,21 | 88,63 | 64,74 | 40,86 |
| * darunter: REG - Nahwärme | 0,68 | 54,93 | 69,99 | 132,44 | 192,15 | 238,53 | 284,90 |
| - Solar (REG-Nahwärme) | 0,00 | 0,61 | 4,22 | 15,48 | 31,29 | 47,10 | 62,90 |
| - Geothermie (REG-Nahwärme) | 0,68 | 3,21 | 8,44 | 26,66 | 65,10 | 98,97 | 132,83 |
| - Biomasse (REG-Nahwärme) | 0,00 | 51,10 | 57,33 | 90,30 | 95,76 | 92,47 | 89,17 |
| REG-Einzelversorgung | 31,97 | 56,62 | 63,58 | 105,78 | 127,05 | 139,56 | 152,07 |
| - Solar (Einzel) | 4,97 | 5,52 | 6,26 | 15,48 | 31,29 | 47,10 | 62,90 |
| - Biomasse (Einzel) | 27,00 | 51,10 | 57,33 | 90,30 | 95,76 | 92,47 | 89,17 |
| Weitere Objektversorgung (Brennstoffzelle, Micro-KWK, Sterling...) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| REG-Potential (ohne konvent. FW) | 32,65 | 111,54 | 133,57 | 238,22 | 319,20 | 378,09 | 436,97 |
| Endenergie (PJ) | 2.401,88 | 2.102,50 | 1.843,77 | 1.635,20 | 1.344,27 | 1.039,29 | 701,84 |
| Anteil REG (%) | 1,36 | 5,31 | 7,24 | 14,57 | 23,75 | 36,38 | 62,26 |
| Anteil REG ohne Wärmestrom (%) | 1,44 | 5,69 | 7,88 | 15,73 | 25,25 | 38,48 | 65,20 |

© Wuppertal Institut (Peter Viebahn, Thomas Hanke), 2009

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Die Übertragung der absoluten erneuerbaren Energiepotenziale aus dem Szenario *MaRes Leit* ergibt, wie in Tab. 5-6 dargestellt, einen anteilmäßig höheren „Erneuerbare“-Anteil, in Relation zur Wärmenachfrage im Szenario *MaRes Leit* von rund 16%.

Trotz der Einbeziehung erweiterter technischer Lösungen zur Reduzierung des Nutzenergiebedarfes sind im Szenario *MaRes Leit* und *MaRes Leit-Plus* lediglich Maßnahmen abgebildet, die unterhalb eines anlegbaren Preises von 6,7 ct/kWh Einsparung (*MaRes Leit*) sowie unter 8,8 ct/kWh (*MaRes Leit-Plus*) liegen. Bei derzeitigen Wärmepreisen von um 6-7 ct/kWh und deren Steigerungsraten in der Zukunft können die umgesetzten Maßnahmen in beiden Fällen als realistische wirtschaftliche Grenzkostenannahme betrachtet werden.

Im Hinblick auf die Analyse und Bewertung der mit der Umsetzung der verschiedenen Zukunftspfade verbundenen Anstrengungen ist es sinnvoll, die gewählte Aufteilung der Szenarien weiter zu verfeinern. Als zusätzliche Gliederungselemente können die energiepolitische *Umsetzungsintensität* sowie die Notwendigkeit zur Durchführung strukturverändernder Maßnahmen verwendet werden. Unter der Umsetzungsintensität ist ein Maßstab für die Tiefe und Breite der erforderlichen Veränderungen sowie die Intensität der diesen entgegastehenden Hemmnissen zu verstehen.

Treibergröße: Entwicklung der Sanierungsrate

Die Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen verläuft langsam und ist dem Tempo des technischen Fortschrittes nicht angepasst, das heißt die technischen Möglichkeiten werden bei weitem nicht ausgenutzt. Dies entspricht dem Sanierungsfortschreiten der letzten 30 Jahre. Investitionsrechnungen des Wirtschaftszweiges „Innenausbau-gewerbe“ haben ergeben, dass die derzeitige Umsetzungsrate von Modernisierungs- und Renovierungsmaßnahmen an Gebäuden, an die eine Maßnahme zu Reduktion des Wärmebedarfes gekoppelt ist, zwischen 0,5 und 0,7% p.a. der Wohnfläche beträgt.

Da weder mit der EnEV 2002 (Ausgangspunkt ist das Szenario-Basisjahr 2005), noch mit deren dynamisierten Nachfolgern wie die im Jahr 2009 in Kraft getretene EnEV 2009, noch mit dem Energiepass als Vertreter harter Maßnahmen sowie mit weiche- ren Maßnahmen wie der Förderung der Energieberatung von Wohngebäuden oder der Änderung des Energiesparrechts eine Sanierungspflicht gekoppelt ist, bleiben die Hemmnisse für eine breite Umsetzung von Wärmeschutzmaßnahmen im Altbau weiterhin bestehen. Evaluierungen der Programme und Maßnahmen (einschließlich der KfW-Kreditvergabe) haben gezeigt, dass die Quote der *Mitnahmeeffekte* dieser Programme relativ hoch ist (Vergleiche Kleemann/Hansen (2005), ISI et al. (2005); Korytarova (2006)). Daraus folgt, dass die Wirkung der Sanierungen, die unmittelbar durch die beschriebenen Maßnahmen getätigt wurden, vor dem Hintergrund des großen Sanierungsstaus marginal ist. Lediglich durch die Energiespartipps und der „Vor-Ort“-Beratung im Zusammenhang mit dem Energiepass lässt eine leichte Zunahme der Sanierungsraten vermuten.

Für die Umsetzungsraten der MaRes-Szenarien gelten die Größenordnung der in Tab. 5-7 niedergelegten Sanierungsraten.

Tab. 5-7: Entwicklung der Umsetzungsraten bei der Sanierung in den MaRes-Szenarien *BAU*, *Leit-Minus*, *Leit* und *Leit-Plus* bezogen auf jährlich sanierte Wohnflächen

| % p.a. | <i>Bis 1998</i> | 1999 - 2005 | 2006 - 2010 | 2011 - 2020 | 2021 - 2030 | 2031 - 2040 | 2041 - 2050 |
|--|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| (1) Autonome Umsetzungsraten (MaRes BAU) | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 |
| (2) Maßnahmen induzierte Umsetzungsrate (MaRes Leit-Minus / MaRes Leit) | | | | | | | |
| - Autonom (siehe oben -1-) | 0 | 0 | 0,08 | 0,12 | 0,4 | 0,4 | 0,6 |
| + Energiepass/-beratung + KfW- CO ₂ -Gebäude- sanierungsprogramm) | 0,06 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | ... | ... | ... |
| ZWISCHENSUMME | | 0,7 | 1,08 | 1,22 | 1,3 | 1,5 | 1,5 |
| (3) Maßnahmen indizierte Umsetzungsrate (MaRes Leit-Plus) | | | | | | | |
| Autonom (siehe -1-) | | | | | | | |
| + Effizienzmaßnahmen (2) | | | | | | | |
| + Erweiterte flankierende Maßnahmen zur Umsetzungssteigerung | | | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| - N.N | | | | | | | |
| SUMME aus (1-3) | | 0,7 | 1,68 | 2 | 2,1 | 2,4 | 2,5 |

Quelle: Rückrechnungen aus Wohnflächen mit geförderten KfW-Mitteln; Modellannahme Hanke / Richter (2007); Energiepassprognose nach BMWA von 0,7 - 1 Mio. Energiepässen pro Jahr

5.4 Produktvarianten (Variation von Produktionsvorketten)

5.4.1 Direkter Stromverbrauch von Heizungen und Dämmstoffherstellung

Über die Einbindung veränderter Strommixe lässt sich der direkte Strombezug der modellierten Prozesse verändern, um eine Entwicklung der Strombereitstellung aus zunehmend regenerativen Quellen darzustellen. Auch durch diese Modifikation der Vorketten ist ein Rückgang beispielsweise der spezifischen THG-Emissionen der Herstellung von Produkten und Bereitstellung von Energie zu erwarten. Dies betrifft insbesondere die Herstellung von Dämmstoffen und den Stromverbrauch von elektrischen Heizungen, in begrenztem Umfang aber zum Beispiel auch den Eigenstrombedarf von Gasheizungen. Die diesbezüglich getroffenen szenariospezifischen Annahmen auf Grundlage von Energieszenarien wurden bereits in Kapitel 5.2 beschrieben.

5.4.2 Treibmittel der Dämmstoffherstellung

Neben der Veränderung der Annahmen zur Entwicklung des Strommixes bietet das Stoffstrommodell eine weitere Möglichkeit, Einfluss auf die Bereitstellungsvorketten der modellierten Produktsysteme zu nehmen:

Die Produktion von extrudiertem Polystyrol (XPS) und anderen Dämmstoffen auf Kunststoff-Basis erfolgt unter Einsatz von Treibmitteln, die zum Aufschäumen des jeweiligen Vorprodukts eingesetzt werden. Die Auswahl des Treibmittels – verwendet werden für XPS überwiegend CO₂ sowie die Fluorkohlenwasserstoffe FKW 134a und FKW 152a – hat dabei große Auswirkung auf die spezifischen Treibhaus- und Ozonabbaukapotenziale der Dämmstoffe, die auf Emissionen der Treibmittel selbst oder auf prozessbedingte Emissionen während der Herstellung zurückgeführt werden können.

Nach FNB (2010) ist in Deutschland hergestelltes XPS weitgehend frei von halogenierten Verbindungen, wird überwiegend mit CO₂ aufgeschäumt und weist dadurch im Vergleich zu FKW-geschäumtem XPS wesentlich geringere Umweltwirkungspotenziale auf. In Ermangelung konkreter Branchendaten zu Marktanteilen von Treibmitteln in der Dämmstoffproduktion wurde innerhalb der MaRess-Szenarien eine konservative Schätzung vorgenommen, die aus Sicht des Treibhaus- und Ozonabbaukapotenzials annähernd einen „Best Case“ darstellt: Der Anteil des Treibmittels CO₂ liegt dabei bereits im Basisjahr 2005 bei 90%, steigt bis 2030 auf 96% an und bleibt dann konstant. Der verbleibende Treibmittelbedarf von 10% bis 4% entfällt jeweils zur Hälfte auf die genannten FKW-Treibmittel. Aus den Modellrechnungen wurde hieraus mittels ecoinvent 2.1 ein spezifisches Treibhauspotenzial von etwa 5 kg CO₂-Äq./kg XPS berechnet.

Die Auswirkungen der Abweichung von dieser Annahme auf die LCA-Ergebnisse werden zusätzlich in einer Sensitivitätsanalyse herausgearbeitet, die für das Szenario *MaRess Leit-Plus* von einer konstanten Treibmittel-Zusammensetzung von 50% CO₂ und jeweils 25% FKW 134a und FKW 152a ausgeht. Das spezifische Treibhauspotenzial steigt durch diese Anpassung etwa um den Faktor 2 gegenüber der oben genannten im Wesentlichen CO₂-basierten Aufschäumung (eigene Berechnungen nach ecoinvent 2.1). Da bei der Produktion des FKW 134a die Ozonabbauenden Substanzen FCKW-113 und H-FCKW-124 freigesetzt werden, ist in der Sensitivität auch mit einem verstärkten Ozonabbaukapotenzial zu rechnen. Die Annahmen zum Treibmittelmix für alle Szenarien und Stützjahre sind in Tab. 5-8 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 5-8: Treibmittelmix der Dämmstoffproduktion (XPS) in den Szenarien

| MaRess-Szenarien | Treibmittel | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| <i>BAU, Leit-Minus, Leit, Leit-Plus</i> | CO ₂ | 90 | 92 | 94 | 96 | 96 | 96 |
| | FKW 134a | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| | FKW 152a | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| <i>Leit Plus mit Sensitivität Treibmittel</i> | CO ₂ | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | FKW 134a | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | FKW 152a | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Alle Angaben in % | | | | | | | |

Quelle: eigene Annahmen und ecoinvent 2.1

5.4.3 Variation des Dämmstoffes

Ausgangspunkt für die Betrachtung der Materialintensitäten ist das Szenario *MaRes Leit-Plus*, das mit zwei Materialvarianten für den Dämmstoff XPS und dem Dämmstoff Zellulose gerechnet worden ist. Dabei wurde die Blickrichtung auf die jeweiligen benötigten Materialinputs gelegt sowie die daraus entstandenen Trade-offs (Material- und Brennstoff-Einsparung gegenüber dem Materialmehrverbrauch) berechnet. Um die Varianz zweier Stoffe in der Analyse möglichst groß und die unterschiedlichen Umweltwirkungen differenziert ermitteln zu können, sind zwei Materialien aus unterschiedlichen Kategorien ausgewählt worden:

- **XPS/EPS** aus der Reihe der geschäumten Kunststoffe wie Polystyrol (Styropor), Neopor oder Polyurethan (XPS und EPS weisen derzeit bis auf die CO₂-Emissionen noch die gleichen Datengrößenordnungen in den MIPS-Kategorien auf. daher wird in der weiteren Betrachtung von XPS ausgegangen, um der Dynamik der technologische Entwicklung Rechnung zu tragen)
- **Zellulose** aus der Reihe der Naturdämmstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen wie Holzfaser, Holzwolle (zement- oder magnesitgebunden, z. B. Heraklith) oder tierische und pflanzliche Fasern wie Schafwolle, Kokosfaser, Hanffaser, Flachsfaser, Kapok, Kork, See- und Wiesengras sowie Schilfrohr(matten) oder Dämmstoffe aus Recyclingmaterial wie Zellulose aus Altpapier.

Ein realistische Abbildung der jeweilig aktuellen Marktverteilung einzelner Dämm-Materialien wurde demnach vernachlässigt.

6 Detaillierung der Szenarien-Eingriffe auf der Nachfrageseite und deren Treibergrößen in *HEAT*

Die im obigen Abschnitt kurz erläuterten politischen und technischen Rahmenbedingungen führen je Szenario zu unterschiedlichen Eingriffen und Wirkungen auf Leitparameter innerhalb des Systemausschnitts. Zur besseren Einordnung und Unterscheidung sind im Folgenden daher kurz die jeweils verwendeten Leitindikatoren aufgeführt.

Szenario *MaRess BAU*

Im Szenario *MaRess BAU* sind lediglich die derzeitigen konkreten politischen Maßnahmen umgesetzt, die im Bereich der privaten Wohnungsbauten gelten (Einführung der EnEV 2009 sowie Einführung des Energiepasses).

Die im Szenario *MaRess BAU* wirkenden Annahmen lassen sich konkret kurz wie folgt zusammenfassen:

Tab. 6-1: Leitindikatoren im Szenario *MaRess BAU*

| | |
|---|---|
| 1 | Sanierungsrate von 0,7%p.a. (Trend-Sparen) |
| 2 | Durchführung von Sanierungs-Maßnahmen zur Bauteilerneuerung von unter 4,4 ct/kWh. Der „ anlegbare Preis “ orientiert sich an derzeitigen Marktpreisen beziehungsweise Amortisationserwartungen auf der Nachfrageseite für Wärme-Energieträger (siehe unten). |
| 3 | Kurzfristige Amortisation von Einsparmaßnahmen (< 4 Jahre) |
| 4 | Geringe Verschärfung der Bauteilanforderungen (im Mittel von 15% des HT'-Wertes) für den Neubau sowie übertragen auch für den Altbau. |
| 5 | Umsetzung der ENEV 2009 für den Neubau sowie darin geltende Bauteilanforderungen |

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Szenario *MaRess Leit-Minus*

Die im Szenario *MaRess Leit-Minus* wirkenden Annahmen lassen sich konkret wie folgt zusammenfassen:

Tab. 6-2: Leitindikatoren im Szenario *MaRes Leit-Minus*

| | |
|---|--|
| 1 | Erhöhung der Sanierungsrate im Gebäudebestand von derzeit rund 0,7%/a auf 1,5%/p.a. |
| 2 | Durchführung von Maßnahmen unterhalb des „anlegbaren Preises“ von 6,7 ct/kWh (mittelfristige Orientierung an Marktpreisentwicklungen von Wärme-Energieträgern) |
| 3 | Kurzfristige Amortisation von Einsparmaßnahmen (< 10 Jahre) |
| 4 | Geringe Verschärfung der Bauteilanforderungen (im Mittel von 15% des HT“-Wertes) für den Neubau sowie übertragen auch für den Altbau. (Entspricht BAU-Anforderung BAU-4) |
| 5 | Deckung der (endenergiebezogenen) Wärmenachfrage von 14% durch erneuerbare Energien. |

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Szenario *MaRes Leit*

Rahmen-Prämisse: Moderate Umsetzungsintensität, keine strukturverändernde Maßnahmen, Einsatz moderner Technologien mit hoher Energieeffizienz.

Die im Szenario *MaRes Leit* wirkenden Annahmen lassen sich konkret kurz wie folgt zusammenfassen:

Tab. 6-3: Leitindikatoren im Szenario *MaRes Leit*

| | |
|----|---|
| 1. | Erhöhung der Sanierungsrate im Gebäudebestand von derzeit rund 0,5%/a auf 1,22% bis 1,5%/p.a., Verstärkung/Verschärfung der Kontrollen bezüglich der Einhaltung von Bau- und Sanierungsvorschriften und Passivhausoffensive nach dem Jahr 2015. |
| 2. | Durchführung von Maßnahmen unterhalb des „anlegbaren Preises“ von 6,8 ct/kWh (langfristige Orientierung an Marktpreisentwicklungen von Wärme-Energieträgern) |
| 3. | Orientierung der Amortisation von Einsparmaßnahmen an der Lebensdauer von Bauteilen (15 - 20 Jahre) |
| 4. | für den Altbau eine Reduzierung der Bauteilanforderungen (im Mittel über HT“) von 80% (Stand: EnEV 2002) |
| 5. | Deckung der (endenergiebezogenen) Wärmenachfrage von 14% durch erneuerbare Energien. |

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Szenario *MaRes Leit-Plus*

Rahmen-Prämisse: Weitgehende Umsetzung der Effizienzpotentiale (mittlere Umsetzungsintensität bei hohem Sanierungsstandard), aber keine direkten strukturverändernde Maßnahmen.

Eine Zusammenfassung der weiteren Maßnahmen in Szenario *MaRes Leit-Plus* zeigt Tab. 6-4. Im hier vorliegenden Szenario *MaRes Leit-Plus* ist nochmals ein zusätzlicher Einspareffekt durch die Erhöhung des anlegbaren Preises von 8,8 ct/kWh erzielt worden. Demnach sind schon 93% des technischen Einsparpotenzials von maximal 1.330 PJ bei gegebenen Umsetzungsstandard betriebswirtschaftlich erreichbar (vergleiche Tab. 7-3). Die Umsetzungsraten sind soweit erhöht worden, dass jedes Gebäude einmal im Szenariohorizont bis 2050 saniert worden ist. Dies bietet sich daher an, da der deutsche Baubestand, der in der historischen Betrachtung der letzten 30 Jahre nur etwa zu 0,5% der Wohnfläche einer Instandhaltung unterzogen worden ist, einen enormen Sanierungsstau abzarbeiten hat.

Tab. 6-4: Leitindikatoren im Szenario *MaRes Leit-Plus*

| | |
|---|--|
| 1 | Erhöhung der Sanierungsrate im Gebäudebestand von derzeit rund 0,5%/a auf 2% bis 2,5%/p.a., Verstärkung/Verschärfung der Kontrollen bezüglich der Einhaltung von Bau- und Sanierungsvorschriften und Passivhausoffensive nach dem Jahr 2015. |
| 2 | Durchführung von Maßnahmen unterhalb des ‚anlegbaren Preises‘ von 8,8 ct/kWh (langfristige Orientierung an Marktpreisentwicklungen von Wärme-Energieträgern) |
| 3 | Orientierung der Amortisation von Einsparmaßnahmen an der Lebensdauer von Bauteilen (15 - 20 Jahre) |
| 4 | Verschärfung der Bauteilanforderungen für den Neubau auf Passivhausstandard ab 2015 sowie |
| 5 | für den Altbau eine Reduzierung der Bauteilanforderungen (im Mittel über HT“) von 80% (Stand: EnEV 2002) |
| 6 | Deckung der (endenergiebezogenen) Wärmenachfrage von der absolut erreichten Deckungsbeiträge aus dem Leit-Szenario durch erneuerbare Energien. (Entspricht ca. 16% der Wärmenachfrage durch den reduzierten Heizwärmebedarf) |

Quelle: Eigene Zusammenstellung

In Tab. 6-5 sind die einzelnen Leitindikatoren zusammengefasst, die laut den jeweiligen Szenarienbetrachtungen variiert worden sind.

Tab. 6-5: Zusammenfassende Darstellung der Einflussgrößen im Gebäudebereich nach Szenarien

| Szenarien | | | | |
|---|--|---|---|--|
| Einflussgröße | MaRes BAU | MaRes Leit-Minus | MaRes Leit | MaRes Leit-Plus |
| Zielvorgaben • Leitstudie 2008 • Sonstiges | a. Endenergie b. Erneuerbare | a. Endenergie b. Erneuerbare | a. Endenergie b. Erneuerbare | --- --- Ergebnisorientiert Vollsanierung bei Ausschöpfung der Potenziale der er- neuerbaren Energien aus dem Leitszenario |
| Leitindikatoren der Nutzenergieebene (Gebäudeeffizienz) | | | | |
| Sanierungsrate | Residuum bis < 0,7% p.a. Derzeitiger Sanie- rungsrate bei der Umsetzung von Wärmetechni- schen Maßnah- men an der Ge- bäudehülle | Residuum bis < 0,7% p.a. | Residuum < 1,5% p.a. Forcierung flankie- render Maßnahmen (Energieberatung Energiepass, KfW) | < 2,5% p.a. Maximale Umset- zung (Vollsanierung) |
| Anlegbarer Preis | | Residuum bis < 4,4 ct/kWh | Residuum bis < 6,7 ct/kWh | 8,8 ct/kWh Orientierung an zu- künftige Preisent- wicklung der Ener- gieträger |
| Amortisations- Erwartung | | < 4 Jahre Gewinnerwartung von Investitionen bei Haushalten | < 10 Jahre Mittlere Gewinner- wartung (Banken- praxis) | < 15 – 20 Jahre Orientierung an Le- benszyklen von Bau- teilerneuerungen |
| Bauteilanforde- rung (Altbau) | EnEV 2009 (Energiespar- verordnung) | EnEV 2009 | -15% HT' (Mittlerer Heizwärmebedarf) (zur Basis EnEV 2009) | Schrittweise Ver- schärfung ab 2020 bis 2050 zum Pas- sivhaus |
| Neubau bis 2020 2020 – 2050 | | Residuum -15% HT' | Residuum - 80% HT' | - 80% HT' Passivhaus |
| Leitindikator(en) der Endenergieebene (Heizungsanlagenmix/-effizienz) | | | | |
| Potenziale er- neuerbare Ener- gien | VORGABE der Referenz- Entwicklung | VORGABE aus dem Leitszenario (D1 verminderte Effizienz) | 14,8% der Wärmenachfra- ge 2020 (ohne Wärmestrom) | Absolut-Werte aus Leitszenario |
| Technischer Fortschritt (spez. Nutzungsgrad) | BAU | BAU | BAU | BAU |

Quelle: Eigene Zusammenstellung

7 Modellierungsergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse des Technologiemoells vorgestellt. Sie münden in die Bereitstellung von Material- und Energiebedarfsdaten, die an das Stoffstrommodell weiter gegeben werden. In einem zweiten Schritt folgen dann die Ergebnisse aus der Ökobilanzierung, die den Trade-off zwischen Effizienzmaßnahmen und Mehrverbrauch an Dämmmaterialien darstellen. Ergänzend wird – ohne Modellumgebung – eine Trade-off Analyse mittels MIPS-Indikatoren durchgeführt, der eine Erweiterung der in Ökobilanzen üblicherweise verwendeten Ressourcenindikatoren darstellt. In diesem Rahmen erfolgt gleichzeitig ein Vergleich der beiden Dämmvarianten XPS und Zellulose.

7.1 Material- und Energieflüsse im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“

In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der MaRess-Szenarienberechnung dargestellt. Sie sind je nach Szenario zusammengefasst und im einzelnen wie folgt strukturiert:

1. *Nutzenergiebilanzen* für Raumwärme in den Alten und Neuen Bundesländern sowie für die Neubau;
2. *Endenergiebilanz* (Raumwärmebedarf);
3. Energieaufwand für den *Warmwasserbedarf*;
4. Entwicklung der *Potenziale für die erneuerbare Energien*;
5. Entwicklung der *Treibhausgas-Emissionen*³, dargestellt als CO₂-Äquivalente (berücksichtigt wurden CO₂, CH₄ und N₂O);
6. *Sanierungskosten (Mehrkostenansatz)*;
7. direkter *Materialaufwand* (durch Dämmmaterialien).

7.1.1 Darstellung der einzelnen Szenarien

Szenario MaRess BAU

Durch die Umsetzung der in Tab. 6-1 dargestellten Maßnahmen ergibt sich eine Einsparung durch Wärmedämmmaßnahmen auf der Nutzenergieebene für das Szenario

³ Die Emissionsfaktoren (Quelle: GEMIS 4.4) innerhalb der Szenarien spiegeln zum einen den Emissionsmix wider, der durch die Vorgaben der EE-Potenziale entsteht. Zum anderen ist jeweils eine moderate Entwicklung der Heizungsanlagen angenommen worden. Eine gesonderte Verschärfung auf der Seite der Anlagentechnik, -substitution sowie Abgaswerte usw. wurde nicht gesondert untersucht. Auf Grund der Verschiedenheit der Modellabgrenzungen und -annahmen von GEMIS im Vergleich zu den Berechnungen in Modul 2 auf Basis von ecoinvent-Daten kommt es zu Differenzen bei der Bilanzierung von spezifischen, indirekten Emissionsfaktoren. Eine Beurteilung der jeweiligen Gesamtemissionen kann ohne Berücksichtigung des jeweiligen Modellkontextes daher nicht vorgenommen werden.

MaRes BAU von 77 PJ bis zum Jahr 2020 sowie 315 PJ bis zum Jahr 2050. Dies entspricht einer Einsparquote von 17,2% für 2050. Insgesamt entsteht durch abgehende Abrisse und hinzukommende Neubauten eine Nutzenergieentwicklung von 1.797 PJ und 1.451 PJ für 2020/2050. Endenergetisch kommt es durch Substitutions- und Modernisierungseffekte von Heizungsanlagen zu einer Reduktion des Energieverbrauches von 15% und 35% in den Jahren 2020 und 2050.

Tab. 7-1: Entwicklung von Nutz- und Endenergie im Szenario *MaRes BAU*

| Entwicklung der Raumwärmenachfrage - Energiebalance - Referenz-Szenario nach Prognos/EWI (MaRes) | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Nutzenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| ABL | 1.696,0 | 1.653,6 | 1.620,0 | 1.587,0 | 1.482,2 | 1.315,3 | 1.132,8 |
| NBL | 137,8 | 129,2 | 124,6 | 114,9 | 103,4 | 87,3 | 58,5 |
| Neubau | 0,0 | 38,8 | 71,6 | 94,7 | 167,6 | 223,3 | 259,7 |
| - davon Einsparung (PJ) | | 26,8 | 22,8 | 27,8 | 62,3 | 81,4 | 94,1 |
| Summe | 1.833,8 | 1.821,6 | 1.816,1 | 1.796,6 | 1.753,2 | 1.625,9 | 1.451,0 |
| - darin: Abriss (PJ) | | 54,4 | 15,5 | 14,8 | 54,0 | 101,6 | 117,2 |
| Endenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | | | | | | | |
| ABL | 1985,6 | 1777,2 | 1704,6 | 1595,9 | 1446,7 | 1272,7 | 1053,7 |
| NBL | 147,3 | 143,7 | 134,8 | 117,7 | 104,4 | 85,4 | 56,3 |
| Neubau | 0,0 | 35,6 | 63,9 | 84,3 | 146,3 | 197,1 | 232,7 |
| Warmwasser | | | | | | | |
| ABL | 264,4 | 235,5 | 199,6 | 200,2 | 193,7 | 187,3 | 177,0 |
| NBL | 55,2 | 47,5 | 40,1 | 39,3 | 37,9 | 38,0 | 36,7 |
| | 319,5 | 282,9 | 239,7 | 239,5 | 231,6 | 225,3 | 213,6 |
| Summe | 2.452,4 | 2.239,4 | 2.142,9 | 2.037,4 | 1.929,1 | 1.780,5 | 1.556,4 |
| Endenergieentwicklung nach Energieträgern (Raumwärme und Warmwasser) im Szenario Referenz-Szenario nach Prognos/EWI (MaRes) | | | | | | | |
| PJ | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Fernwärme (+REG-NW*) | 161,5 | 163,9 | 166,1 | 165,9 | 143,1 | 150,6 | 158,0 |
| Öl | 943,0 | 838,0 | 799,8 | 739,5 | 575,8 | 470,4 | 347,2 |
| Gas | 989,0 | 1052,3 | 1007,0 | 962,3 | 1047,8 | 1026,6 | 931,5 |
| Kohle | 154,7 | 25,9 | 15,1 | 14,1 | 13,5 | 11,9 | 9,8 |
| Strom | 164,7 | 123,6 | 119,0 | 119,1 | 110,8 | 73,9 | 53,6 |
| Solar (Einzel) *) | 5,0 | 9,7 | 11,9 | 13,5 | 18,0 | 29,0 | 40,0 |
| Biomasse (Einzel) *) | 27,0 | 26,0 | 24,0 | 23,0 | 20,0 | 18,1 | 16,3 |
| Summe | 2.444,9 | 2.239,4 | 2.142,9 | 2.037,4 | 1.929,1 | 1.780,5 | 1.556,4 |
| Index | 100% | 92% | 88% | 83% | 79% | 73% | 64% |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Im Bereich der Treibhausgas-Emissionen kommt es im Szenario *MaRes BAU* durch die Heizwärmereduktion und die Wirkungsgradverbesserung der Heizsysteme zu den Einsparungen von rund 24% im Jahr 2020 sowie 50% im Jahr 2050.

Die Analyse der jeweiligen Einspareffekte (Wärmedämmung, Effizienz) zeigt im zeitlichen Verlauf eine endenergie-orientierte Entwicklung, das heißt durch den Energiequotient zwischen CO₂-Reduktionspotenzial und Energieverbrauch wird deutlich, dass die Eingriffe nach dem Jahr 2020 zu einer verstärkten Emissions- und Energiereduktion führen. Dadurch wird deutlich, dass Maßnahmen insbesondere zur Heizungsmodernisierung im Zeitraum 2020-2050 gegenüber einer konstanten wärmetechnischen Wohnraummodernisierung zum Tragen kommen.

Tab. 7-2: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario *MaRes BAU* [in CO₂-Äquivalenten]

| Emissionen | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 1.000 t | | | | | | | |
| Fernwärme | 6.639,2 | 6.739,8 | 6.828,6 | 6.819,0 | 5.883,0 | 6.189,3 | 6.495,6 |
| Öl | 69.939,2 | 62.151,1 | 59.316,2 | 54.843,9 | 42.703,1 | 34.885,7 | 25.750,9 |
| Gas | 54.943,2 | 58.463,1 | 55.943,4 | 53.459,5 | 58.213,7 | 57.036,1 | 51.749,8 |
| Kohle | 15.042,4 | 2.518,7 | 1.471,1 | 1.375,0 | 1.317,0 | 1.153,0 | 957,4 |
| Strom | 43.976,0 | 29.496,4 | 28.389,8 | 28.423,9 | 26.440,6 | 16.344,8 | 10.998,8 |
| Solar (Einzel) *) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Biomasse (Einzel) *) | 277,5 | 267,2 | 246,7 | 236,3 | 205,6 | 186,2 | 167,1 |
| Summe | 190.817,5 | 159.636,3 | 152.195,7 | 145.157,5 | 138.763,0 | 115.795,0 | 96.119,6 |
| | 100,0% | 83,7% | 79,8% | 76,1% | 72,7% | 60,7% | 50,4% |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

In Tab. 7-3 sind die kostenseitigen Ergebnisse dargelegt, die durch die wärmetechnischen Maßnahmen im Szenario *MaRes BAU* verursacht worden sind (Kosten auf der Seite der Angebotsseite (Heizungsanlagen, Erneuerbare Energien) wurden nicht berücksichtigt). Der obere Teil spiegelt die Wärmereduktionen mit insgesamt 315 PJ an Nutzenergie durch Gebäudesanierungen im Altbaubestand (ohne Abrisse) wider, die zu Kosten von insgesamt 11,6 Mrd. Euro (Mehrkosten) erwirtschaftet worden sind.

Tab. 7-3: Entwicklung der Sanierungskosten im Szenario *MaRes BAU*

| Entwicklung der wirtschaftlichen Kennzahlen im Gebäudebereich privater Haushalte - Szenario: Referenz-Szenario nach Prognos/EWI (MaRes) | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Einsparung in PJ durch Gebäudesanierungen**) | | | | | | | |
| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| ABL | | 18,1 | 18,1 | 18,1 | 50,8 | 65,3 | 65,3 |
| NBL | | 8,6 | 4,7 | 9,6 | 11,5 | 16,1 | 28,8 |
| Summe | | 26,8 | 22,8 | 27,8 | 62,3 | 81,4 | 94,1 |
| | | | | | | | 235,8 |
| | | | | | | | 79,3 |
| | | | | | | | 315,2 |
| Mehrkosten in 1.000 € | | | | | | | |
| | 2006 - 2010 | 2011 - 2015 | 2016 - 2020 | 2021 - 2030 | 2031 - 2040 | 2041 - 2050 | Summe |
| ABL | 867.138 | 867.138 | 867.138 | 2.427.986 | 3.121.697 | 3.121.697 | 11.272.794 |
| NBL | 23.551 | 23.551 | 23.551 | 65.944 | 84.785 | 84.785 | 306.168 |
| Summe | 890.689 | 890.689 | 890.689 | 2.493.930 | 3.206.482 | 3.206.482 | 11.578.963 |
| Einsparungskosten (Gesamtsystem/Mehrkostenansatz) - Cent/kWh*) | | | | | | | |
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | Summe |
| ABL | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 |
| NBL | 0,08 | 0,14 | 0,07 | 0,16 | 0,15 | 0,08 | 0,11 |
| Summe | 0,92 | 1,08 | 0,89 | 1,11 | 1,09 | 0,94 | 1,02 |
| Barwerte in 1.000 € | | | | | | | |
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | |
| Abdiskontiert auf 2005 | 732.082 | 601.718 | 494.568 | 935.515 | 812.572 | 548.945 | 4.125.400 |
| Annuitätische Jahreskosten in 1.000 € p.a. | | | | | | | 24.679 |
| *) Zins (real): % 4 | | | | | | | |
| **) Sanierungsrate % p.a. 0,625 0,625 0,625 0,7777778 1 1 | | | | | | | |
| Derzeitige Umsetzungsrate ca. 0,7% p.a.) | | | | | | | |
| Version: 1.02 © Wuppertal Institut, 2010 | | | | | | | |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

In den Kosten sind nur Maßnahmen berücksichtigt, die betriebswirtschaftlich bezogen auf die Einzeltechnik zu 4,7 ct/kWh_{Einsparung} zu stehen sind, das heißt jede Kilowattstunde, die eingespart werden konnte, liegt unterhalb eines „virtuellen“ Energiepreises. Diese Kostenmarge ist im Szenario *MaRes BAU* hinsichtlich der geforderten Wärmedämmstandards aber unterdurchschnittlich ausgeschöpft. So sind im Szenario *MaRes*

BAU Maßnahmen umgesetzt worden, die hinsichtlich ihrer Einsparung durchschnittlich 1,02 ct/kWh kosten. Im Vergleich zu den (derzeitigen) Brennstoffpreisen von etwa 6 ct/kWh zeigt sich das nicht ausgeschöpfte Potenzial von Wärmedämmmaßnahmen im Altbaubereich. Werden die Gesamtkosten mit einem Zinssatz von 4% annuitätisch auf das Jahr 2005 abdiskontiert, entstehen Jahreskosten von rund 25 Mio. Euro.

Tab. 7-4: Ergebnisse der Materialbilanzierung für das Szenario *MaRes BAU* für XPS

| Ergebnisse der Materialbilanzierung | | | | |
|--|--|-----------|-----------|-------------|
| Szenario: | MaRes BAU nach Prognos/EWI (MaRes) - XPS | | | |
| [t] | Eingesetztes Dämm-Material je Bauteil | | | |
| | DA | AW | KE | Summe |
| 2010 | 65.206,9 | 95.780,8 | 129.817,8 | 290.805,5 |
| 2015 | 65.206,9 | 95.780,8 | 129.817,8 | 290.805,5 |
| 2020 | 65.206,9 | 95.780,8 | 129.817,8 | 290.805,5 |
| 2030 | 182.579,4 | 268.186,2 | 363.489,9 | 814.255,5 |
| 2040 | 234.745,0 | 344.810,8 | 467.344,2 | 1.046.899,9 |
| 2050 | 234.745,0 | 95.780,8 | 129.817,8 | 460.343,6 |
| Umrechnung [von m ³ in Tonnen] bei einer durchschnittlichen Dichte (kg/m ³) von | | | | 30 |
| SUMME | 3.193.946 | | | |

Anmerkung: DA – Dach; AW – Außenwand; KE – Kellerdecke

Quelle: Eigene Modellrechnungen

In der Tab. 7-4 sind die eingesetzten kumulierten Materialmengen bilanziert, die im Szenario *MaRes BAU* zum Tragen kommen. Im XPS-Sanierungsfall (das heißt einer mittleren Dichte von 30 kg/m³) werden rund 3,2 Mio. Tonnen Dämmmaterial verwendet. Bei gleichen Mengen in den Zeitreihen bedeutet dies, dass die Umsetzungsintensität und -qualität konstant über den Szenariozeitraum hinweg angenommen wurde.

Szenario *MaRes Leit-Minus*

Durch die in Tab. 6-2 dargelegten Maßnahmen nimmt die absolute *Nutzenergie* im Szenario *MaRes Leit-Minus* in Höhe von 60 PJ (2020) sowie um 437 PJ (2050) auf 1.773 PJ (2020) beziehungsweise 1.397 PJ (2050) ab. Die Einsparung teilt sich auf in Abrisse in Höhe von 84 PJ (2020)/358 PJ(2050) sowie reine Einsparungen im verbleibenden Altbaubestand von 60 PJ (2020)/437 PJ (2050). Demgegenüber stehen Wohnraumaktivierungen durch Neubauten in Höhe von 205 PJ (2020) und 856 PJ (2050).

Die *Endenergie* entwickelt sich inklusive der Entwicklung des Warmwasserbedarfes dementsprechend von einem Anfangswert für 2005 von 2.452 PJ auf jeweils 1.904 PJ (2020) sowie 1.348 PJ (2050). Dies bedeutet eine Reduktion von 498 PJ (2020) und 1.024 PJ (2050) und entspricht einer Reduktionsquote von 21% (2020) und 45% (2050).

Tab. 7-5: Entwicklung von Nutz- und Endenergie im Szenario *MaRes Leit-Minus*

| Entwicklung der Raumwärmenachfrage - Energiebalance - MaRes Leit-minus | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Nutzenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| ABL | 1.696,0 | 1.646,4 | 1.605,4 | 1.565,2 | 1.445,9 | 1.271,8 | 1.082,0 |
| NBL | 137,8 | 128,8 | 123,7 | 113,7 | 101,3 | 84,8 | 55,5 |
| Neubau | 0,0 | 38,8 | 71,6 | 94,7 | 167,6 | 223,3 | 259,7 |
| - davon Einsparung (PJ) | | 34,4 | 30,5 | 35,5 | 77,7 | 89,1 | 101,8 |
| Summe | 1.833,8 | 1.813,9 | 1.800,8 | 1.773,5 | 1.714,8 | 1.579,8 | 1.397,2 |
| - darin: Abriss (PJ) | | 54,4 | 15,5 | 14,8 | 54,0 | 101,6 | 117,2 |
| Endenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | | | | | | | |
| ABL | 1985,6 | 1732,8 | 1592,9 | 1469,0 | 1302,7 | 1093,9 | 886,3 |
| NBL | 147,3 | 143,2 | 132,2 | 113,9 | 98,5 | 78,8 | 50,8 |
| Neubau | 0,0 | 40,5 | 71,1 | 92,0 | 154,0 | 196,3 | 222,5 |
| Warmwasser | | | | | | | |
| ABL | 264,4 | 232,8 | 188,5 | 188,4 | 179,1 | 166,9 | 153,3 |
| NBL | 55,2 | 50,4 | 41,8 | 40,8 | 38,6 | 37,3 | 34,7 |
| | 319,5 | 283,2 | 230,3 | 229,2 | 217,6 | 204,2 | 188,1 |
| Summe | 2.452,4 | 2.199,8 | 2.026,5 | 1.904,0 | 1.772,8 | 1.573,1 | 1.347,7 |

Anmerkung: *) Enthält Anteile erneuerbarer Energien

Quelle: Eigene Modellrechnungen

In Tab. 7-6 ist die Entwicklung der *Treibhausgas-Emissionen* im Szenario *MaRes Leit-Minus* aufgezeigt. Zum einen kommen hier gegenüber dem Szenario *MaRes BAU* die Erhöhung der Umsetzungsraten, die Erhöhung der Sanierungsqualität der Bauteilerneuerungen sowie eine Loslösung von fossilen Energieträgern zu Gunsten erneuerbarer Energiequellen zum Tragen. Bei einer Halbierung des Nutzenergiebedarfes sowie einer Erhöhung der erneuerbaren Energien auf etwa 40% im Jahre 2050 kommt es zu einer Reduktion der Treibhausgase von 51%.

Tab. 7-6: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario *MaRes Leit-Minus* [in CO₂-Äquivalenten]

| Emissionen | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 1.000 t | | | | | | | |
| Fernwärme | 6.639,2 | 8.167,5 | 8.532,4 | 8.964,9 | 9.804,3 | 10.158,0 | 10.511,8 |
| Öl | 69.939,2 | 54.877,8 | 45.114,9 | 38.133,2 | 25.510,7 | 15.500,0 | 7.387,3 |
| Gas | 54.943,2 | 57.445,1 | 52.692,4 | 50.009,2 | 51.050,6 | 47.276,4 | 40.430,5 |
| Kohle | 15.042,4 | 2.000,6 | 1.025,3 | 945,8 | 390,8 | 85,7 | 71,0 |
| Strom | 43.976,0 | 35.779,2 | 44.866,2 | 45.064,3 | 42.743,7 | 37.800,9 | 33.583,1 |
| Solar (Einzel) *) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Biomasse (Einzel) *) | 277,5 | 525,2 | 589,2 | 640,7 | 684,3 | 643,7 | 604,4 |
| Summe | 190.817,5 | 158.795,4 | 152.820,5 | 143.758,1 | 134.184,3 | 111.464,7 | 92.588,0 |
| | 100,0% | 83,2% | 80,1% | 75,3% | 70,3% | 58,4% | 48,5% |

Anmerkung: Enthält Energieträger aus erneuerbaren Energien

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Die kostenseitigen Entwicklungen, die durch die wärmetechnischen Maßnahmen im Szenario *MaRes Leit-Minus* verursacht worden sind, werden in Tab. 7-7 dargestellt (Kosten auf der Angebotsseite wie Heizungsanlagen und erneuerbare Energien konnten in diesem Teil der Studie nicht abgeschätzt werden). Im oberen Teil lässt sich erkennen, dass insgesamt 369 PJ an Nutzenergie durch Gebäudesanierungen im Altbaubestand (ohne Abrisse) eingespart worden sind, die zu Kosten von insgesamt 14,1 Mrd. Euro (Mehrkosten) erwirtschaftet worden sind. In den Kosten sind nur Maßnahmen berücksichtigt, die bezogen auf die Einzeltechnik zu 6,7 ct/kWh zu entstehen sind, das heißt jede Kilowattstunde, die eingespart werden konnte, liegt unterhalb eines virtuellen Energiepreises dieser Wirtschaftlichkeitsgrenze.

Werden die Gesamtkosten mit einem Zinssatz von 4% annuitätisch auf das Jahr 2005 abdiskontiert, entstehen Jahreskosten von rund 31,6 Mio. Euro.

Die Tab. 7-8 zeigt die eingesetzten Materialmengen (XPS) im Szenario *MaRes Leit-Minus*. Gegenüber dem Szenario *MaRes BAU* steigt die Menge auf rund 4 Mio. Tonnen um rund 0,8 Mio. Tonnen oder 2,6% an.

Tab. 7-7: Entwicklung der wirtschaftlichen Kennzahlen im Szenario *MaRes Leit-Minus*

| Entwicklung der wirtschaftlichen Kennzahlen im Gebäudebereich privater Haushalte - Szenario: MaRes Leit-minus | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Einsparung in PJ durch Gebäudesanierungen**) | | | | | | | |
| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| ABL | | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 65,3 | 72,6 | 72,6 |
| NBL | | 9,0 | 5,1 | 10,1 | 12,4 | 16,5 | 29,2 |
| Summe | | 34,4 | 30,5 | 35,5 | 77,7 | 89,1 | 101,8 |
| | | | | | | | |
| Mehrkosten in 1.000 € | | | | | | | |
| | 2006 - 2010 | 2011 - 2015 | 2016 - 2020 | 2021 - 2030 | 2031 - 2040 | 2041 - 2050 | Summe |
| ABL | 1.213.993 | 1.213.993 | 1.213.993 | 3.121.697 | 3.468.552 | 3.468.552 | 13.700.781 |
| NBL | 32.972 | 32.972 | 32.972 | 84.785 | 94.206 | 94.206 | 372.112 |
| Summe | 1.246.965 | 1.246.965 | 1.246.965 | 3.206.482 | 3.562.758 | 3.562.758 | 14.072.893 |
| | | | | | | | |
| Einsparkosten (Gesamtsystem/Mehrkostenansatz) - Cent/kWh*) | | | | | | | |
| | | | | | | | Summe |
| ABL | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 |
| NBL | 0,10 | 0,18 | 0,09 | 0,19 | 0,16 | 0,09 | 0,13 |
| Summe | 1,00 | 1,13 | 0,97 | 1,14 | 1,11 | 0,97 | 1,06 |
| | | | | | | | |
| Barwerte in 1.000 € | | | | | | | |
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | |
| Abdiskontiert auf 2005 | 1.024.915 | 842.405 | 692.396 | 1.202.805 | 902.858 | 609.938 | 5.275.317 |
| Annuitätische Jahreskoten in 1.000 € p.a. | | | | | | | 31.558 |
| | | | | | | | |
| *) Zins (real): % 4 | | | | | | | |
| **) Sanierungsrate % p.a. 0,875 0,875 0,875 1,000 1,111 1,111 | | | | | | | |
| Derzeitige Umsetzungsrate ca. 0,7% p.a.) | | | | | | | |
| Version: 2.02 © Wuppertal Institut, 2010 | | | | | | | |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Tab. 7-8: Ergebnisse der Materialbilanzierung für das Szenario *MaRes Leit-Minus*

| Ergebnisse der Materialbilanzierung | | | | | |
|--|---------------------------------------|-----------|-----------|----|-------------|
| Szenario: MaRes Leit-minus | | | | | |
| [t] | Eingesetztes Dämm-Material je Bauteil | | | | Summe |
| | DA | AW | KE | FE | |
| 2010 | 91.289,7 | 134.093,1 | 181.745,0 | | 407.127,8 |
| 2015 | 91.289,7 | 134.093,1 | 181.745,0 | | 407.127,8 |
| 2020 | 91.289,7 | 134.093,1 | 181.745,0 | | 407.127,8 |
| 2030 | 234.745,0 | 344.810,8 | 467.344,2 | | 1.046.899,9 |
| 2040 | 260.827,8 | 383.123,1 | 519.271,3 | | 1.163.222,2 |
| 2050 | 260.827,8 | 134.093,1 | 181.745,0 | | 576.665,8 |
| Umrechnung [m ³ in Tonnen] bei einer durchschnittlichen Dichte (kg/m ³): 30 | | | | | |
| © Wuppertal Institut (Thomas Hanke), 2009 | | | | | 4.008.171 |

Anmerkung: DA – Dach; AW – Außenwand; KE - Kellerdecke

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Szenario *MaRes Leit*

Die *Nutzenergie-Einsparungen* im Szenario *MaRes Leit* sind durch die hohe Umsetzungsintensität (Standard der Wärmedämmung auf Passiv-Hausstandard) sowie durch den drastisch gesteigerten Umsetzungsumfang (Sanierungsanteil an der Gesamt-Wohnfläche bei annähernder Vollsanierung) auf 22% im Jahre 2020 sowie 66% der Gesamtwohnfläche im Jahre 2050 gesteigert worden.

Einen ebenso forcierenden Einspareffekt auf die Nutzenergie bewirkt das erhöhte Wirtschaftlichkeitsniveau von wärmetechnischen Maßnahmen gegenüber den anderen Szenarien. Im Szenario *MaRes Leit-Minus* sind alle Maßnahmen zum Einsatz gekommen, deren Einsparkosten von 4,7 ct/kWh, im Szenario *MaRes Leit* von 6,7 ct/kWh unterschreiten.

Tab. 7-9: Entwicklung von Nutz- und Endenergie im Szenario *MaRes Leit*

| Entwicklung der Raumwärmenachfrage - Energiebalance - MaRes Leit | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Nutzenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| ABL | 1.696,0 | 1.623,5 | 1.550,9 | 1.470,2 | 1.284,5 | 1.051,3 | 802,3 |
| NBL | 137,8 | 127,7 | 121,0 | 108,9 | 93,2 | 73,8 | 41,7 |
| Neubau | 0,0 | 28,6 | 45,6 | 58,3 | 94,1 | 122,0 | 142,2 |
| - davon Einsparung (PJ) | | 58,4 | 63,7 | 78,0 | 147,4 | 151,1 | 163,8 |
| Summe | 1.833,8 | 1.779,7 | 1.717,5 | 1.637,4 | 1.471,9 | 1.247,0 | 986,2 |
| - darin: Abriss (PJ) | | 54,4 | 15,5 | 14,8 | 54,0 | 101,6 | 117,2 |
| Endenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | | | | | | | |
| ABL | 1985,6 | 1715,1 | 1562,5 | 1406,5 | 1197,8 | 967,3 | 724,1 |
| NBL | 147,3 | 141,7 | 130,8 | 110,3 | 91,3 | 68,8 | 38,2 |
| Neubau | 0,0 | 30,1 | 44,2 | 61,4 | 95,9 | 120,4 | 137,5 |
| Warmwasser | | | | | | | |
| ABL | 264,4 | 231,2 | 189,8 | 190,9 | 182,5 | 174,4 | 164,3 |
| NBL | 55,2 | 47,0 | 39,4 | 38,3 | 36,2 | 35,7 | 33,2 |
| | 319,5 | 278,2 | 229,2 | 229,2 | 218,7 | 210,1 | 197,6 |
| Summe | 2.452,4 | 2.165,1 | 1.966,6 | 1.807,4 | 1.603,7 | 1.366,6 | 1.097,5 |
| Endenergieentwicklung nach Energieträgern (Raumwärme und Warmwasser) im Szenario MaRes Leit | | | | | | | |
| PJ | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Fernwärme (+REG-NW*) | 161,5 | 198,7 | 205,1 | 238,7 | 271,7 | 289,7 | 307,6 |
| Öl | 943,0 | 732,9 | 601,8 | 477,6 | 315,1 | 207,2 | 109,0 |
| Gas | 989,0 | 1020,3 | 927,2 | 845,9 | 785,4 | 634,9 | 450,2 |
| Kohle | 154,7 | 9,1 | 8,1 | 2,2 | 0,9 | 0,7 | 0,6 |
| Strom | 164,7 | 147,5 | 155,8 | 124,9 | 91,0 | 75,6 | 52,9 |
| Solar (Einzel) *) | 5,0 | 5,6 | 11,3 | 27,9 | 43,8 | 65,9 | 88,1 |
| Biomasse (Einzel) *) | 27,0 | 51,1 | 57,3 | 90,3 | 95,8 | 92,5 | 89,2 |
| Summe | 2.444,9 | 2.165,1 | 1.966,6 | 1.807,4 | 1.603,7 | 1.366,6 | 1.097,5 |
| Index | 100% | 89% | 80% | 74% | 66% | 56% | 45% |

Anmerkung: *) Enthält Energieträger aus erneuerbaren Energien

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Die Endenergie entwickelt sich analog zur drastisch reduzierten Nutzenergie sowie durch die einhergehenden Modernisierung von Heizungsanlagen in ähnlicher Höhe. Im Jahr 2020 erreicht die Endenergienachfrage einen Wert von 1.807 PJ (inklusive Warmwasserbedarf), dies entspricht einer Reduktion von 25%. Im Jahre 2050, wo

letztendlich alle Maßnahmen voll zum Tragen kommen (siehe Tab. 6-3), wird noch insgesamt 1.097 PJ Endenergie nachgefragt. Dies entspricht einer Reduktion um 55%.

In Tab. 7-10 sind die Potenziale der erneuerbaren Energieträger für das Szenario *MaRes Leit* aufgezeigt. Der Deckungsbeitrag zur Endenergie ist exogen auf 14% gesetzt worden – die Verteilung der Energieträger ist den derzeitigen Entwicklungen harmonisch angepasst worden.

Tab. 7-10: Entwicklung der erneuerbaren Energien-Potenziale im Szenario *MaRes Leit*

| EE-Potenziale | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------------|--------------|
| Fernwärme | 185,4 | 160,9 | 154,2 | 147,3 | 135,3 | 112,7 | 90,0 |
| Objektversorgung | 0,0 | 5,6 | 43,3 | 57,6 | 64,8 | 32,4 | 0,0 |
| Biomasse (Einzel) | 57,0 | 72,0 | 74,6 | 65,1 | 75,1 | 66,7 | 58,5 |
| Solar(Einzel) | 2,5 | 13,2 | 26,3 | 39,6 | 60,6 | 68,3 | 76,0 |
| Solar(Nahwärme) | 0,1 | 2,7 | 15,8 | 21,6 | 72,9 | 109,2 | 145,6 |
| Geothermie | 0,7 | 3,2 | 12,4 | 25,2 | 50,0 | 72,5 | 95,0 |
| Biomasse (Nahwärme) | 12,2 | 27,3 | 44,7 | 50,8 | 69,7 | 64,6 | 59,5 |
| Summe | 257,9 | 284,9 | 371,3 | 407,2 | 528,3 | 526,5 | 524,7 |
| Anteil EE-Pot. [%] | 3% | 5% | 10% | 14% | 26% | 35% | 52% |
| Version High Potential 2.2 | | | | | © Wuppertal Institut, 04.06.2008 | | |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Die zuvor beschriebenen Maßnahmen zur Einsparung der Heizenergie führen zu drastischen Einsparungen bei den Treibhausgas-Emissionen. Im Jahr 2020 werden nur noch 62,2% und 2050 nur noch 14,8% des jeweiligen Anfangswertes von 195.240 t emittiert.

Tab. 7-11: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario *MaRes Leit* [in CO₂-Äquivalenten]

| Emissionen | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1.000 t | | | | | | | |
| Fernwärme | 6.639,2 | 8.167,5 | 8.432,2 | 9.813,5 | 11.171,4 | 11.908,4 | 12.645,4 |
| Öl | 69.939,2 | 54.360,4 | 44.635,6 | 35.418,8 | 23.372,3 | 15.369,5 | 8.086,9 |
| Gas | 54.943,2 | 56.683,8 | 51.510,2 | 46.996,1 | 43.635,0 | 35.273,9 | 25.009,7 |
| Kohle | 15.042,4 | 881,4 | 783,6 | 210,3 | 86,5 | 70,8 | 54,0 |
| Strom | 43.976,0 | 35.187,6 | 37.184,4 | 29.801,8 | 21.703,2 | 16.721,4 | 10.858,3 |
| Solar (Einzel) *) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Biomasse (Einzel) *) | 277,5 | 525,2 | 589,2 | 928,1 | 984,2 | 950,3 | 916,5 |
| Summe | 190.817,5 | 155.805,9 | 143.135,2 | 123.168,7 | 104.952,6 | 80.294,3 | 57.570,7 |
| | 100,0% | 81,7% | 75,0% | 64,5% | 55,0% | 42,1% | 30,2% |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Diese großen Einsparungen werden erzielbar durch eine konsequente Vermeidung von fossilen Energieträgern und eine forcierte wärmetechnische Wohnraum- und Heizungsmodernisierung. Wie im Vorfeld erläutert wurde, sind die nutzenergetischen Einsparpotenziale durch Einzelmaßnahmen erzielt worden, deren spezifische Einsparkosten weniger als 6,7 ct/kWh betragen. Die Wärmegestehungskosten durch den technologischen Einsatz der erneuerbaren Energieträger konnten im Rahmen dieser Szenarioanalyse nicht analysiert werden.

Tab. 7-12: Entwicklung der wirtschaftlichen Kenngrößen im Szenario *MaRes Leit*

| Entwicklung der wirtschaftlichen Kennzahlen im Gebäudebereich privater Haushalte - Szenario: MaRes Leit | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Einsparung in PJ durch Gebäudesanierungen**) | | | | | | | | |
| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | Summe |
| ABL | | 48,3 | 57,1 | 65,8 | 131,7 | 131,7 | 131,7 | 566,3 |
| NBL | | 10,2 | 6,7 | 12,1 | 15,7 | 19,4 | 32,1 | 96,1 |
| Summe | | 58,4 | 63,7 | 78,0 | 147,4 | 151,1 | 163,8 | 662,4 |

| Mehrkosten in 1.000 € | | | | | | | | Summe |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|------------|
| | 2006 - 2010 | 2011 - 2015 | 2016 - 2020 | 2021 - 2030 | 2031 - 2040 | 2041 - 2050 | | |
| ABL | 4.384.038 | 5.181.135 | 5.978.233 | 11.956.467 | 11.956.467 | 11.956.467 | | 51.412.806 |
| NBL | 110.357 | 130.422 | 150.487 | 300.975 | 300.975 | 300.975 | | 1.294.191 |
| Summe | 4.494.395 | 5.311.558 | 6.128.721 | 12.257.441 | 12.257.441 | 12.257.441 | | 52.706.997 |

| Einsparkosten (Gesamtsystem/Mehrkostenansatz) - Cent/kWh*) | | | | | | | | Summe |
|--|------|------|------|------|------|------|--|-------|
| ABL | 2,51 | 2,51 | 2,51 | 2,51 | 2,51 | 2,51 | | 2,51 |
| NBL | 0,30 | 0,54 | 0,34 | 0,53 | 0,43 | 0,26 | | 0,37 |
| Summe | 2,13 | 2,31 | 2,18 | 2,30 | 2,25 | 2,07 | | 2,20 |

| Barwerte in 1.000 € | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | |
| Abdiskontiert auf 2005 | 3.694.065 | 3.588.298 | 3.403.061 | 4.597.972 | 3.106.225 | 2.098.454 | 20.488.076 |
| Annuitätische Jahreskosten in 1.000 € p.a. | | | | | | | 122.562 |

| | | |
|--|--|--|
| *) Zins (real): % | | 4 |
| **) Sanierungsrate % p.a. | | 1,38 1,63 1,88 1,67 1,67 1,67 |
| Derzeitige Umsetzungsrate ca. 0,7% p.a.) | | |
| Version: 2.03 | | |
| © Wuppertal Institut, 2010 | | |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

In Tab. 7-12 sind die kostenseitigen Ergebnisse dargelegt, die durch die wärmetechnischen Maßnahmen im Szenario *MaRes Leit* verursacht worden sind. Kosten auf der Angebotsseite (Heizungsanlagen, erneuerbare Energien) konnten in diesem Teil der Studie nicht abgeschätzt werden. Im oberen Teil lässt sich ersehen, dass insgesamt 663 PJ an Nutzenergie durch Gebäudesanierungen im Altbaubestand (ohne Abrisse) eingespart worden ist, die zu Kosten von insgesamt 53 Mrd. Euro (Mehrkosten) entstanden sind.

Im Gegensatz zu den Szenarien *MaRes BAU* und *MaRes Leit-Minus* verfolgt das Szenario *MaRes Leit* das so genannte *Kopplungsprinzip*, das besagt, dass preiswerte Maßnahmen unterhalb der Wirtschaftlichkeitsgrenze teurere Maßnahmen mit finanzieren. Dabei werden auch Einzelmaßnahmen in die Sanierungsstrategie einbezogen, die oberhalb des „virtuellen“ Energiepreises von 6,7 ct/kWh_{Einsparung} liegen, deren Gesamtkosten aller Maßnahmen je Gebäudetyp jedoch unterhalb dieser Wirtschaftlichkeitsgrenze liegen.

Werden die Gesamtkosten mit einem Zinssatz von 4% annuitätisch auf das Jahr 2005 abdiskontiert, entstehen Jahreskosten von rund 123 Mio. Euro.

Tab. 7-13 zeigt die Materialbilanzierung des eingesetzten Dämmstoffes im Szenario *MaRes Leit*. Durch die sehr angezogene Umsetzungsintensität der Sanierungsmaßnahmen von jährlich 0,7% auf 1,5% der Wohnfläche steigt die XPS-Materialmenge auf insgesamt 15,9 Mio. Tonnen Dämmstoff an. Dies bedeutet eine Steigerung von 4 Mio. Tonnen im Szenario *MaRes Leit-Minus* um fast 11 Mio. Tonnen. Demgegenüber steht aber eine weitere CO₂-Reduktion von weiteren 18%.

Tab. 7-13: Ergebnisse der Materialbilanzierung im Szenario *MaRes Leit*

| Ergebnisse der Materialbilanzierung | | | | |
|--|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Szenario: | MaRes Leit | | | |
| | Eingesetztes Dämm-Material je Bauteil | | | |
| [t] | DA | AW | KE | Summe |
| 2010 | 324.368,3 | 594.023,2 | 616.418,3 | 1.534.809,8 |
| 2015 | 383.344,4 | 702.027,4 | 728.494,4 | 1.813.866,2 |
| 2020 | 442.320,4 | 810.031,7 | 840.570,5 | 2.092.922,5 |
| 2030 | 884.640,8 | 1.620.063,3 | 1.681.140,9 | 4.185.845,0 |
| 2040 | 884.640,8 | 1.620.063,3 | 1.681.140,9 | 4.185.845,0 |
| 2050 | 884.640,8 | 594.023,2 | 616.418,3 | 2.095.082,4 |
| Umrechnung [m3 in Tonnen] bei einer durchschnittlichen Dichte (kg/m3) von 37 | | | | |
| © Wuppertal Institut (Thomas Hanke), 2009 | | | | 15.908.371 |

Anmerkung: DA – Dach; AW – Außenwand; KE - Kellerdecke

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Szenario *MaRes Leit-Plus*

Die Maßnahmen im Szenario *MaRes Leit-Plus* führen zu einer Mehreinsparung gegenüber dem Szenario *MaRes Leit* von rund 390 PJ oder weiteren 17 Prozentpunkten. Die Endenergie beläuft sich somit auf 702 PJ im Jahre 2050.

Bis zum Jahr 2020 werden durch den erweiterten Einsatz von erneuerbaren Energien (hier als Beispiel die Übertragung der Potentiale aus dem Effizienz-Szenario) ca. 6 – 7% der Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem Szenario *MaRes Leit* eingespart, bis zum Jahr 2050 sogar rund 13%. Dies liegt einerseits an der konsequenten Vermeidung fossiler Energieträger zu Gunsten CO₂-ärmeren Energiequellen, zum anderen werden durch die in den Markt drängenden neuen Energieträger zunehmend ebenso neue Heizungsanlagen und -konzepte eingeführt, die einen höheren Wirkungsgrad als die Altanlagen haben.

Tab. 7-14: Entwicklung von Nutz- und Endenergie in der Variantenrechnung des Szenarios *MaRes Leit-Plus*

| Entwicklung der Raumwärmenachfrage - MaRes Leit plus | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Nutzenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| ABL | 1.696,0 | 1.572,7 | 1.449,0 | 1.326,1 | 1.055,9 | 756,1 | 420,2 |
| NBL | 137,8 | 125,0 | 115,7 | 101,3 | 81,2 | 58,4 | 23,8 |
| Neubau | 0,0 | 28,6 | 44,1 | 55,6 | 91,0 | 118,8 | 139,1 |
| - davon Einsparung (PJ) | | 111,9 | 117,5 | 122,4 | 236,3 | 221,1 | 214,8 |
| Summe | 1.833,8 | 1.726,2 | 1.608,7 | 1.483,0 | 1.228,1 | 933,3 | 583,1 |
| - darin: Abriss (PJ) | | 54,4 | 15,5 | 14,8 | 54,0 | 101,6 | 117,2 |
| Endenergieentwicklung in PJ | | | | | | | |
| Raumwärme | | | | | | | |
| ABL | 1985,6 | 1659,7 | 1459,2 | 1267,3 | 983,0 | 689,4 | 381,2 |
| NBL | 147,3 | 138,4 | 124,7 | 102,4 | 79,3 | 53,8 | 21,1 |
| Neubau | 0,0 | 28,7 | 44,0 | 60,3 | 95,1 | 120,7 | 139,4 |
| Warmwasser | | | | | | | |
| ABL | 264,4 | 225,4 | 175,8 | 166,2 | 0,7 | 0,5 | 130,7 |
| NBL | 55,2 | 50,3 | 40,0 | 39,0 | 35,6 | 34,7 | 29,5 |
| | 319,5 | 275,7 | 215,8 | 205,2 | 36,3 | 35,1 | 160,2 |
| Summe | 2.452,4 | 2.102,5 | 1.843,8 | 1.635,2 | 1.193,7 | 899,0 | 701,8 |
| Endenergieentwicklung nach Energieträgern (Raumwärme und Warmwasser) im Szenario MaRes Leit plus | | | | | | | |
| PJ | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Fernwärme (+REG-NW*) | 161,5 | 198,7 | 207,5 | 247,7 | 280,8 | 303,3 | 325,8 |
| Öl | 943,0 | 690,6 | 553,4 | 406,0 | 227,6 | 96,0 | 17,2 |
| Gas | 989,0 | 1005,9 | 863,0 | 752,7 | 628,2 | 443,2 | 175,2 |
| Kohle | 154,7 | 8,8 | 7,6 | 2,0 | 0,7 | 0,5 | 0,0 |
| Strom | 164,7 | 141,9 | 148,7 | 121,1 | 80,0 | 56,8 | 31,6 |
| Solar (Einzel) *) | 5,0 | 5,6 | 6,3 | 15,5 | 31,3 | 47,1 | 62,9 |
| Biomasse (Einzel) *) | 27,0 | 51,1 | 57,3 | 90,3 | 95,8 | 92,4 | 89,2 |
| Summe | 2.444,9 | 2.102,5 | 1.843,8 | 1.635,2 | 1.344,3 | 1.039,3 | 701,8 |
| Index | 100% | 86% | 75% | 67% | 55% | 43% | 29% |

Anmerkung: *) Anteile enthält Energieträger aus erneuerbaren Energien

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Aus Tab. 7-15 wird ersichtlich, dass im Jahr 2020 rund 41% der Treibhausgas-Emissionen und bis zum Jahr 2050 sogar 83% oder rund 160.000 t eingespart werden. Damit konnte der System-Emissionsfaktor von durchschnittlich 285 g/kWh auf nur 160 g/kWh gesenkt werden.

Tab. 7-15: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Szenario *MaRes Leit-Plus* [in CO₂-Äquivalenten]

| Emissionen | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1.000 t | | | | | | | |
| Fernwärme | 6.639,2 | 8.167,5 | 8.532,4 | 10.181,2 | 11.543,0 | 12.467,7 | 13.392,4 |
| Öl | 69.939,2 | 51.219,5 | 41.041,4 | 30.113,6 | 16.877,5 | 7.121,7 | 1.276,6 |
| Gas | 54.943,2 | 55.882,6 | 47.942,7 | 41.815,2 | 34.897,7 | 24.624,6 | 9.732,1 |
| Kohle | 15.042,4 | 856,4 | 735,5 | 192,9 | 71,1 | 50,9 | 0,0 |
| Strom | 43.976,0 | 33.855,5 | 35.489,9 | 28.901,3 | 19.085,7 | 12.549,6 | 6.490,4 |
| Solar (Einzel) *) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Biomasse (Einzel) *) | 277,5 | 525,2 | 589,2 | 927,7 | 984,2 | 949,4 | 916,5 |
| Summe | 190.817,5 | 150.506,7 | 134.331,2 | 112.131,9 | 87.459,2 | 57.764,0 | 31.808,0 |
| | 100,0% | 78,9% | 70,4% | 58,8% | 45,8% | 30,3% | 16,7% |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Tab. 7-16 illustriert die Ergebnisse der Materialbilanzierung im Szenario *MaRes Leit-Plus*. Der drastische Materialmehrbedarf kommt zustande durch die (fast) ausgeschöpfte Umsetzungsintensität der Wärmeschutzmaßnahmen sowie die höhere Dichte der Materialeigenschaft von 37 kg/m^3 , um die Wärmeschutz-Anforderungen (U-Werte) zu erreichen. Dem gegenüber steht eine Nutzwärmeeinsparung von 1.024 PJ, was einer Reduktion der benötigten Heizenergie von fast 68% bedeutet. Demgegenüber erreichte das Szenario *MaRes Leit* eine absolute Heizenergie-Einsparung von 847 PJ beziehungsweise 46% der Heizenergie.

Tab. 7-16: Ergebnisse der Materialbilanzierung im Szenario *MaRes Leit-Plus*

| Ergebnisse der Materialbilanzierung für XPS | | | | |
|--|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Szenario: | MARESS LEIT PLUS | | | |
| | Eingesetztes Dämm-Material je Bauteil | | | |
| [t] | DA | AW | KE | Summe |
| 2010 | 1.474.401,4 | 2.227.587,0 | 1.531.391,2 | 5.233.379,6 |
| 2015 | 1.608.437,9 | 2.430.095,0 | 1.670.608,6 | 5.709.141,4 |
| 2020 | 1.608.437,9 | 2.430.095,0 | 1.670.608,6 | 5.709.141,4 |
| 2030 | 3.216.875,7 | 4.860.189,9 | 3.341.217,2 | 11.418.282,8 |
| 2040 | 2.948.802,8 | 4.455.174,1 | 3.062.782,4 | 10.466.759,3 |
| 2050 | 2.680.729,8 | 4.050.158,3 | 2.784.347,7 | 9.515.235,7 |
| XPS-Umrechnung [m3 in Tonnen] bei einer durchschnittlichen Dichte (kg/m/m3) von 37 | | | | |
| © Wuppertal Institut (Thomas Hanke), 2009 | | | | 48.051.940 |

Anmerkung: DA – Dach; AW – Außenwand; KE - Kellerdecke

Quelle: Eigene Modellrechnungen

7.1.2 Szenarienvergleich

Um die Entwicklungen in den einzelnen Szenarien folgerichtig zu interpretieren, sind die nachstehenden – teilweise sich gegenseitig aufhebenden – Teilentwicklungen zu unterscheiden. Die Pfeile geben eine Absenkung oder einen Anstieg der Nutzenergienachfrage an:

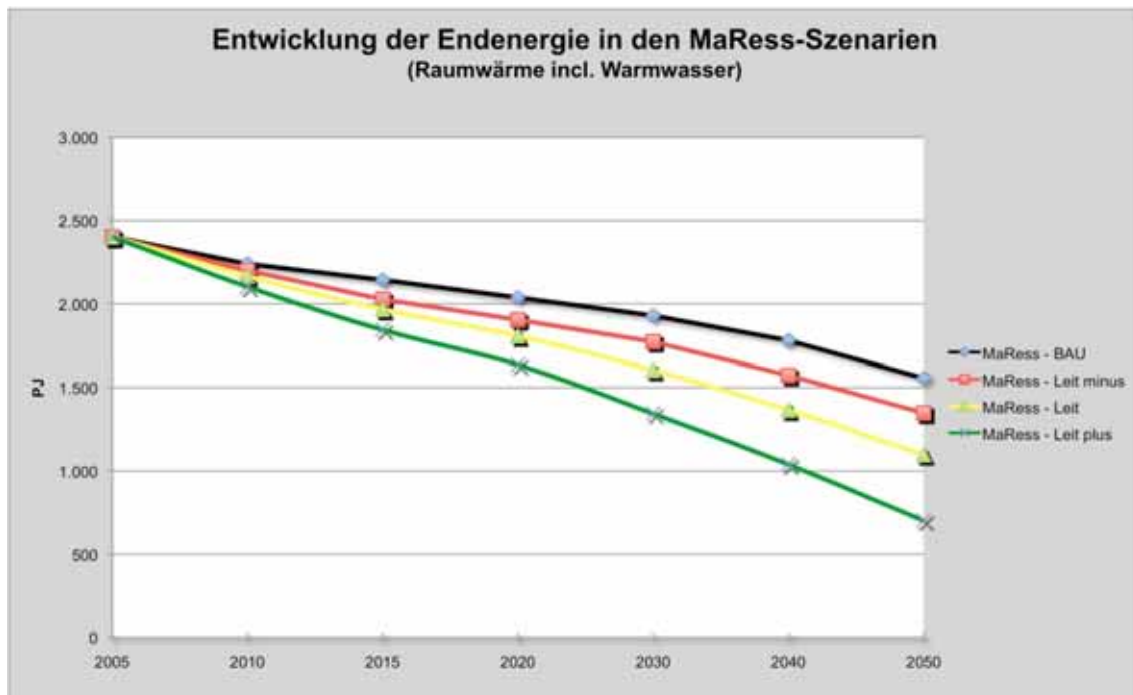
- ➊ Der *Abriss* im Altbaubestand senkt die erforderliche Nutzenergienachfrage zum Zeitpunkt des Basisjahres (2005), das heißt jedes Gebäude, das aus dem Bestand entnommen wird, wird im unsanierten Zustand abgerissen.
- ➋ Die *Sanierung* des Altbaubestandes senkt die erforderliche Nutzenergienachfrage im Zeitpunkt des Bilanz- oder Stützjahres.
- ➌ Der *Neubau* steigert die erforderliche Nutzenergienachfrage durch die hinzukommende Wohnflächenentwicklung.
- ➍ Die sinkende *Bevölkerungsentwicklung* senkt die Nutzenergienachfrage pro Person. Bei sinkenden Haushaltsgrößen, aber gleich bleibenden beziehungsweise steigenden Wohnflächen durch den Anstieg des Komfortanspruches entsteht somit ein (über-)kompensierender Effekt.
- ➎ Durch die *Substitution* von Einzelraum- beziehungsweise Etagenheizungen durch Zentralheizungen steigt der so genannte *Benutzungsumfang*. Das heißt durch den steigenden Komfortanspruch werden nicht mehr bedarfsorientiert Räume einer Wohnung geheizt, sondern in der Regel alle Räume gleichermaßen. Dadurch steigt die Endenergienachfrage trotz verbessertem Wirkungsgrad der Heizungsanlage.
- ➏ Durch die Erneuerung und Substitution von Heizungsanlagen werden in der Regel deutlich verbesserte *Wirkungsgrade* erzielt, mit der Folge einer Endenergieeinsparung.

Anmerkung: ➊ erhöhende Wirkung; ➋ vermindernde Wirkung

Wie die Entwicklung der Emissionen in Abb. 7-2 verdeutlicht, führt der Business-as-usual Pfad zu einer Verringerung der Treibhausgas-Emissionen im Jahre 2020 von 24% sowie im Jahre 2050 zu einer Verringerung von 50% zur Basis 2005. Abb. 7-1 zeigt die entsprechende Endenergieentwicklung mit einer Reduktion von 15% (2020) und 35% (2050).

Werden die Maßnahmen auf der Nutzenergieebene soweit verstärkt, dass der Umsetzungsgrad (Sanierungstätigkeit) sowie ein verstärkter Einsatz der erneuerbaren Energien im Leit-Szenario vorangetrieben wird, lässt sich weitere Energie einsparen, und zwar bis zum Jahre 2020 um 10%, was einer Treibhausgas-Reduzierung von 11% entspricht, und bis zum Jahr 2050 19% Endenergie bei 20%iger Einsparung der Treibhausgase.

Abb. 7-1: Vergleich der Endenergienachfrage in den MaRes-Szenarien *BAU*, *Leit-Minus*, *Leit* und *Leit-Plus* für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2050



Quelle: Eigene Modellrechnungen

Im Szenario *MaRes Leit-Plus* kommen weitere flankierende strukturverändernde Maßnahmen zur Geltung, was sich in der Relation der Emissionsreduktion (Reduzierung um weitere 13% auf 17% gegenüber dem Szenario *MaRes Leit*) sowie energetisch (Reduktion um weitere 17% auf nun 29% im Jahr 2050) ausdrückt.

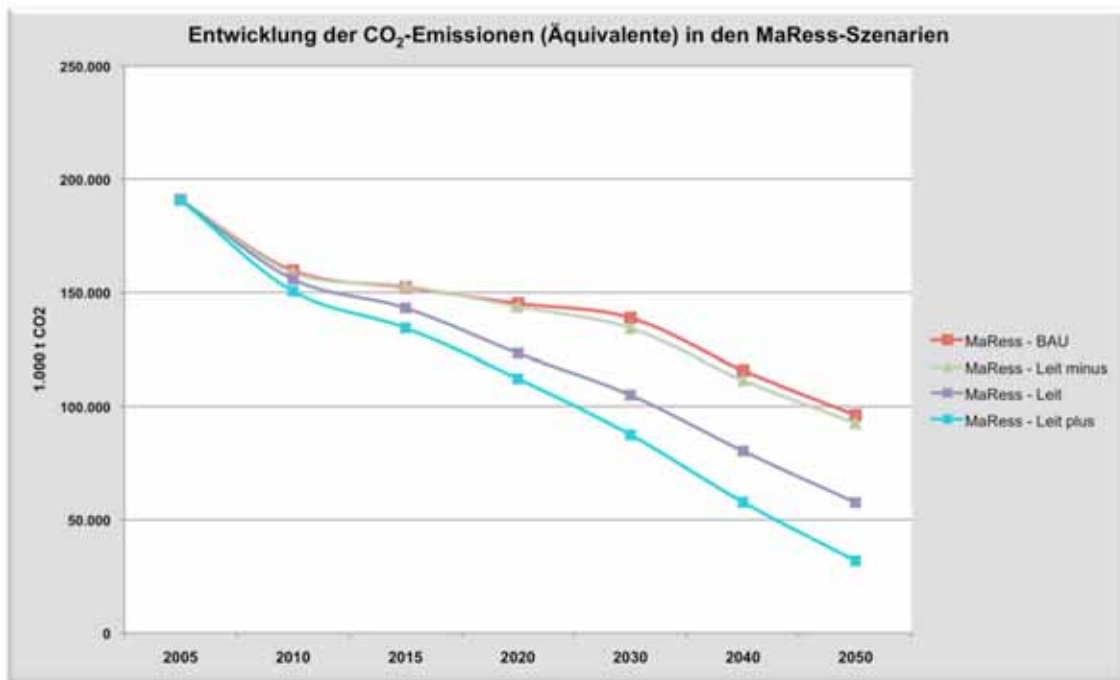
Stellt man die Einsparungen (von Energie und Emissionen) der beiden Szenarien *MaRes BAU* und *MaRes Leit* gegenüber, wird deutlich, dass ein verstärkter Einsatz von erneuerbaren Energien zu einem überproportionalen Sprung bei der Einsparung von Emissionen führt.

Im Szenario *MaRes Leit-Plus* wirkt sich die Sanierungsqualität (stufenweise Verschärfung der Altbausanierung auf Passivhausstandard) besonders auf den Nutzenergiebedarf aus, so dass ein gleichmäßiger Verlauf von Nutzenergie-, Endenergie- und Emissionsreduktion in Verbindung mit dem Einsatz erneuerbarer Energien entsteht. Die forcierte Einsparstrategie im Szenario *MaRes Leit-Plus* führt nutzerenergetisch zu einer Einsparung von 1.250 PJ und einer endenergetischen Einsparung von ca. 1.700 PJ oder 70%; emissionsseitig bedeutet dies eine Reduktion von 83%.

Werden zusätzliche Maßnahmen durch Erhöhung der Anteile der erneuerbaren Energien, wie im Szenario *MaRes Leit-Plus*, vorgenommen, können weitere Einsparungen auf der Seite der Endenergie (bei gleichem Nutzenergieniveau) erzielt werden. In dem Fall des Szenarios *MaRes Leit-Plus* sinkt der Endenergieverbrauch um weitere 4 Prozentpunkte auf 738 PJ im Jahre 2050. Diese Reduktion ist vor allem durch eine stärker-

re Substitutionserhöhung von Heizungsanlagen im Altbaubestand (und deren Wirkungsgraderhöhung) zurückzuführen.

Abb. 7-2: Vergleich der Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in den MaRes-Szenarien *BAU*, *Leit-Minus*, *Leit* und *Leit-Plus* für die Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2050

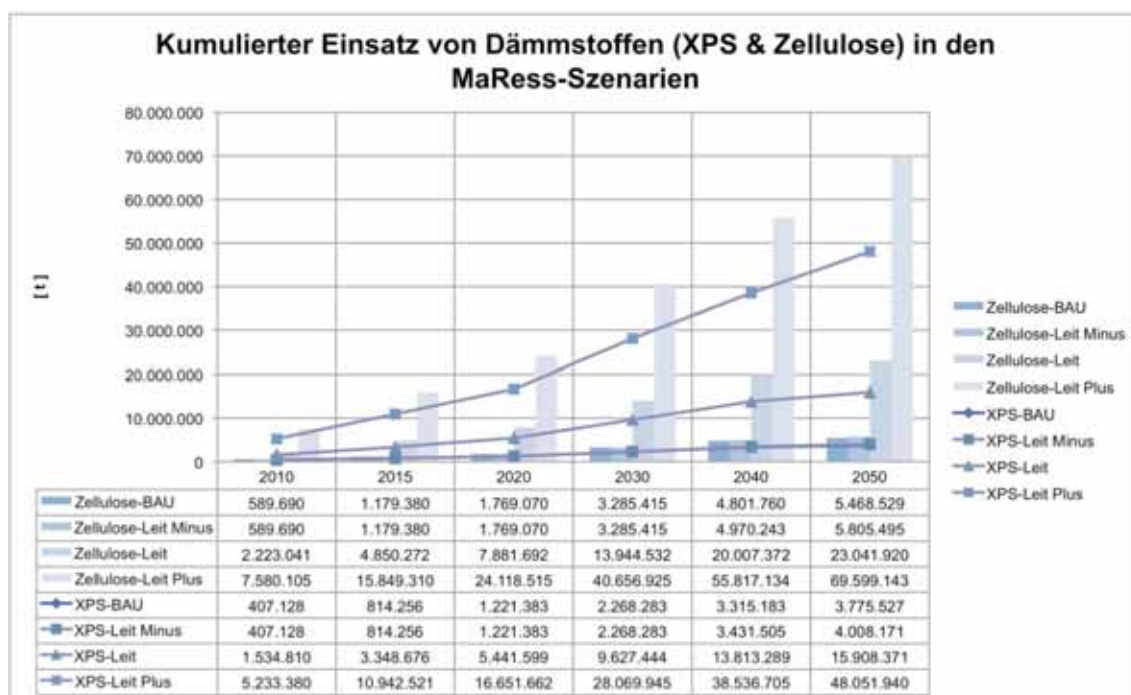


Quelle: Eigene Modellrechnungen

Über die reinen quantitativen Einsparungseffekte von Energie und Emissionen hinaus entstehen durch eine der Substitution neuerer Heizungsanlagen vorgeschaltete Sanierungsstrategie auch Wirkungen auf einer sekundären Ebene.

Ein für den Einsatz von erneuerbaren Energien sowie deren in Verbindung stehenden Heizungstechnologien zusätzlich günstiger Effekt entsteht durch die drastische *Reduzierung der inneren Wärmelasten*. Somit können so genannte KfW-40-Häuser (oder besser) mit Vorlauftemperaturen von unter 40°C betrieben werden, die einen Einsatz und damit einen zusätzlichen verzahnenden Effekt von Effizienz und Erneuerbaren begünstigen. Weiterhin ist anzumerken, dass eine integrative forcierte Verzahnungsstrategie die Einbindung von erneuerbaren Energien und deren Heizungstechnologien von der industriellen Vorfertigung (zum Beispiel Gestaltung von Dachelementen) bis hin zur Baustellenorganisation hat.

Abschließend ist in Abb. 7-3 die Entwicklung der in den MaRes-Szenarien eingesetzten direkten Dämmstoffmengen bei gleicher Dämmstoffwirkung (U-Wert) bilanziert. Wie erkennbar ist, wird je mehr XPS (dargestellt als durchgezogene Linie) benötigt, je anspruchsvoller die Sanierungsvorgaben der vier Szenarien sind.

Abb. 7-3: Kumulierter Einsatz von Dämmstoffen (XPS und Zellulose) in den MaRes- Szenarien *MaRes BAU*, *MaRes Leit-Minus*, *MaRes Leit* und *MaRes Leit-Plus*

Quelle: Eigene Modellrechnungen

7.1.3 Variation der Dämmstoffe (XPS versus Zellulose)

Zum Ende des Szenarios *MaRes Leit-Plus* im Jahr 2050 ist der jährliche nutzerenergetische Heizenergiebedarf um ca. 1.024 PJ Heizenergie durch Wärmedämm-Maßnahmen reduziert worden. Während die ersten drei Szenarien mit dem Dämmmaterial XPS modelliert worden sind, wurde bei diesem Szenario zu Vergleichszwecken zusätzlich das Material Zellulose eingesetzt (siehe Kapitel 5.4.3). Die dafür erforderlichen Mengen an Dämmmaterial zeigt ebenfalls Abb. 7-3. Beide Varianten, XPS und Zellulose, sind von den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) so angesetzt worden, dass sie demselben Wärmedämmstandard für das jeweilige Bauteil entsprechen. Der Materialmehrerbrauch für Zellulose erklärt sich dadurch, dass XPS eine wesentliche geringere Dichte (37 kg/m^3) im Vergleich zu Zellulose (55 kg/m^3) aufweist.

7.2 Ökobilanz-Ergebnisse

Die Darstellungen der Ökobilanz-Ergebnisse beziehen sich auf das Residuum an Emissionen beziehungsweise Umweltwirkungen des Untersuchungssystems (Kombination der Gebäudebeheizung und -dämmung) im Betrachtungszeitraum von 2005 bis 2050 – nach Anrechnung der für das jeweilige Szenario maßgeblichen Effekte (zum Beispiel energetische Sanierung, sinkende Endenergiebedarfe, steigende Anteile Erneuerbarer Energiequellen für die Gebäudeversorgung mit Heizenergie). Die Ergebnisse werden an Hand zwei verschiedener Abbildungstypen erläutert:

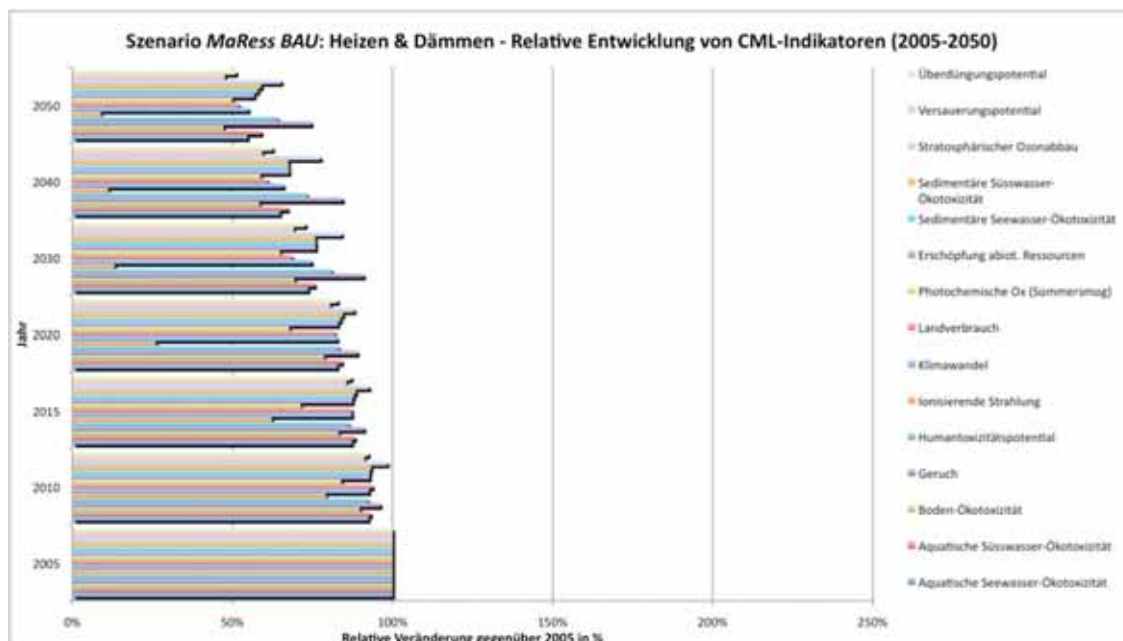
- Übersicht der relativen Entwicklung aller Indikatoren des Sets „CML 2001“ (siehe Kapitel 3.3) im Vergleich zum Basisjahr zur Abschätzung genereller Trends
- absolute Entwicklung einzelner Indikatoren, differenziert nach Verursachergруппen (regenerative Nahwärme- und konventionelle Fernwärmeversorgung, elektrische, solare, biomasse-befeuerte und fossile Heizungen sowie Dämmstoffe) zur näheren Analyse der Verursacher einer Ab- oder Zunahme von Indikatorwerten im Zeitverlauf

Während die Übersicht der relativen Entwicklung für jedes Szenario abgebildet wird, können aus der Vielzahl von Beschreibungen der Einzelindikatoren nur einige wenige Diagramme beispielhaft ausgewählt werden. Im Fokus steht dabei auf Grund seiner hohen gesellschaftlichen Relevanz das Treibhauspotenzial. Dieses wird je nach Szenario durch Abbildungen weiterer Indikatoren ergänzt, die etwa Aufschluss über die Verursacher von Trade-off Effekten geben.

Für die Berechnungen war es erforderlich, für jede Technologiekatēorie aus *HEAT* einen Referenzprozess zu wählen, der stellvertretend für vergleichbare Technologien steht, die aber möglicherweise abweichende Spezifikationen oder Vorketten aufweisen. So ist beispielsweise der Landverbrauch durch die Bereitstellung von Strom und Wärme über ein Biogas-BHKW sehr von der jeweiligen Anlagenauslegung und der Substratwahl (etwa Gülle oder nachwachsende Rohstoffe) abhängig. Die folgenden Ergebnisse können deshalb nur grobe Abschätzungen der Umweltwirkungen sein, die sich im Zusammenspiel der energetischen Sanierung und der Nutzung verschiedener Heizungstechnologien auf der Makroebene ergeben könnten. Da die Entwicklung einzelner Indikatoren sehr von der jeweils im Stoffstrommodell angenommenen Referenztechnologie abhängen kann, sind die Ergebnisse nicht geeignet, um direkte Rückschlüsse auf die Beiträge bestimmter Produkte oder Technologien zur Reduktion definierter Emissionen auf der Mikroebene zu ziehen oder vergleichende Aussagen zu Produkten zu tätigen. Hierfür ist eine zusätzliche Detailanalyse erforderlich, die im Rahmen dieser Untersuchung auf Grund der Vielzahl möglicher Technologien nicht durchführbar ist und deshalb durch pauschale Annahmen ersetzt wurde.

Szenario *MaRess BAU*

Ein Vergleich der relativen Entwicklungen aller im Szenario *MaRess BAU* betrachteten emissionsbedingten potenziellen Umweltwirkungen ist in Abb. 7-4 dargestellt. Als deutlich erkennbarer Trend ist hier ein kontinuierlicher, aber nur moderater Rückgang aller betrachteten CML-Indikatoren um jeweils etwa 30-50% bis 2050 im Vergleich zu 2005 zu erkennen.

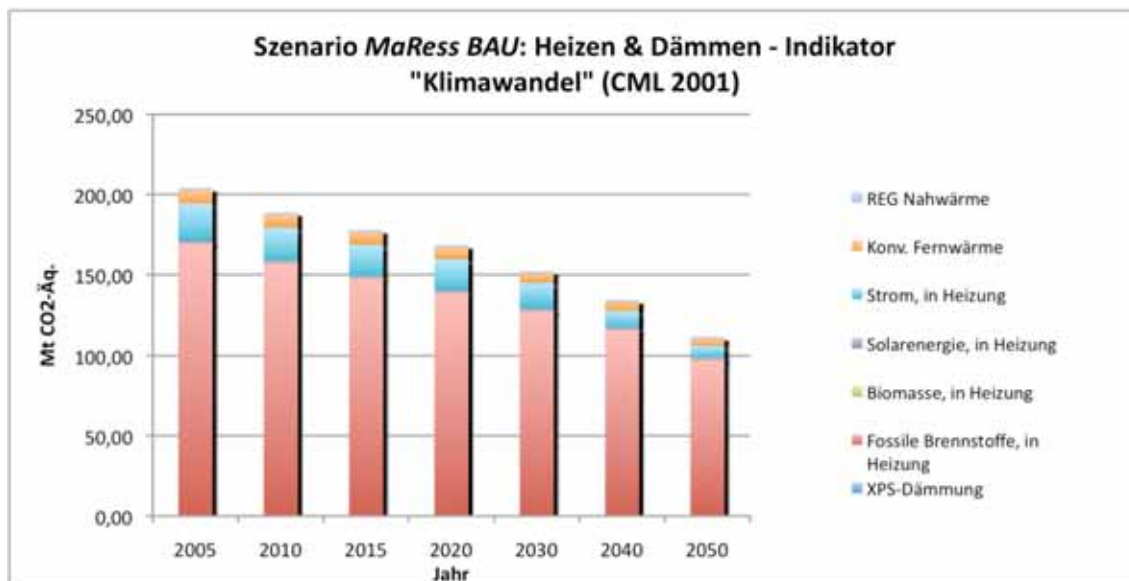
Abb. 7-4: Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario *MaRes BAU*

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Ein drastischer Rückgang auf nur etwa 10% des Basiswerts schon bis 2030 ist nur im Fall des Indikators „Ionisierende Strahlung“ zu erkennen. Diese Entwicklung ist darin begründet, dass im Strommix für den direkten Strombezug der betrachteten Prozesse ab dem Stützjahr 2030 keine Atomenergie mehr enthalten ist. Um den Modellierungsaufwand zu begrenzen, wurde in den Vorketten der Prozesse benötigte elektrische Energie (etwa zur Herstellung eines Heizkessels) dagegen nicht durch einem variablen Mix dargestellt, sondern durch implizite Annahmen zum Strombezug aus einem konstanten Mix mit Kernenergie-Anteil. Die spezifischen Strommengen solcher vorgelagerter Prozesse (je kg Dämmstoff oder je MJ Heizenergie-Nutzung) sind im Vergleich zum direkten Bedarf in der Herstellung oder Nutzung des Endprodukts zwar meist gering, sind in der Auswertung aber an einem geringen Residuum des Indikators „Ionisierende Strahlung“ auch nach 2020 zu erkennen. Die zum Atomausstieg getroffene Annahme gilt gleichermaßen für alle Szenarien, weshalb die Tendenz der Entwicklung des Indikators szenarioübergreifend beobachtet werden kann.

Die Beiträge des XPS zu den verschiedenen Wirkungskategorien sind dabei auf Grund niedriger Tonnagen nur sehr gering. Sie liegen beispielsweise im Fall des von der Nutzung fossiler Heizenergieträger dominierten Indikators „Klimawandel“ im Bereich zwischen minimal 199 und maximal 455 kt und sind deshalb in der beispielhaften Abbildung der absoluten Werte dieses Indikators in Abb. 7-5 nicht erkennbar.

Abb. 7-5: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario *MaRess BAU*

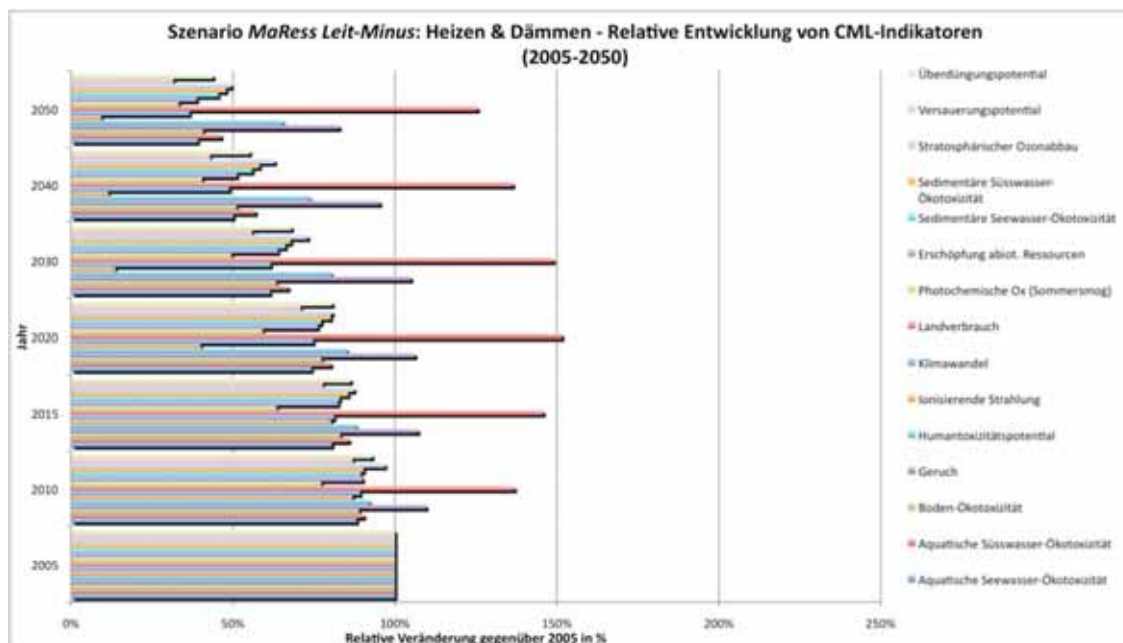


Quelle: Eigene Modellrechnungen

Zwischen den verschiedenen Umweltwirkungen, die vom CML-Indikatorenset erfasst werden, sind im Szenario *MaRess BAU* keine Trade-offs erkennbar – es findet also kein Rückgang eines Indikators auf Kosten der Zunahme eines anderen statt.

Szenario *MaRess Leit-Minus*

Abb. 7-6 zeigt die relative Entwicklung des CML-Indikatorensets im Szenario *MaRess Leit-Minus*. Erkennbar ist dabei ein im Vergleich zu *MaRess BAU* wesentlich stärkerer Rückgang eines Großteils der Indikatoren um 50-70% bis 2050 gegenüber 2005.

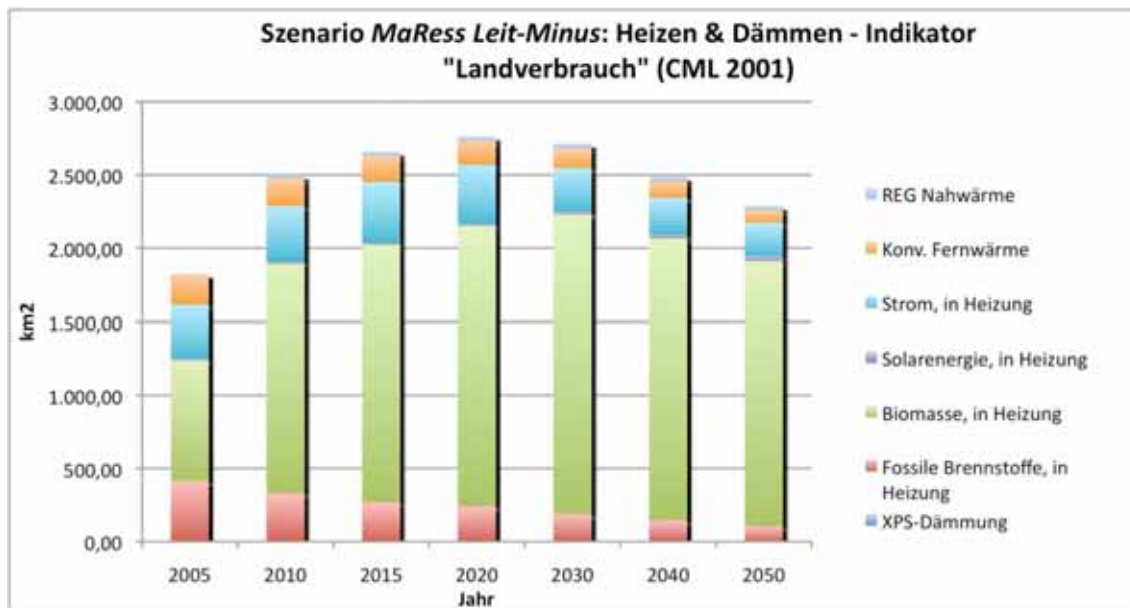
Abb. 7-6: Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario *MaRes Leit-Minus*

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Im Gegensatz zum Szenario *MaRes BAU* sind hier allerdings Trade-off Effekte zwischen unterschiedlichen Umweltwirkungen erkennbar: Der Bezug von elektrischer Heizenergie, in geringem Umfang aber auch die verstärkte Nutzung von Solarthermie und Biomasse, verursachen nur geringe Rebound-Effekte, die den Rückgang des Indikators „Humantoxizitätspotenzial“ leicht verlangsamen. Die verstärkte Biomassenutzung kann sich dabei auf die Feinstaub-Belastung auswirken, die hier aber nicht separat erfasst wird, sondern ein Bestandteil des Indikators „Humantoxizitätspotenzial“ ist.

Der von fossilen Brennstoffen dominierte Indikator „Geruch“ steigt durch zunehmende Biomasse-Anteile im Strommix und regenerative Nahwärme zunächst über den Wert des Basisjahrs, sinkt bis 2050 aber durch die Einsparung fossiler Heizenergie darunter ab. Der „Landverbrauch“ liegt dagegen durch die Nutzung von Biomasse in Pellet- und Stückholz-Heizungen im Jahr 2050 als einziger Indikator des Szenarios über dem Basiswert von 2005; er steigt zwischenzeitlich in den Jahren 2020 und 2030 auf 150% des Basiswerts an. Diese Entwicklung ist jedoch unabhängig von Effizienzmaßnahmen zu sehen, da sie auf Szenario-Annahmen zur Deckung des restlichen Wärmebedarfs durch erneuerbare Energien zurück geht. Da bei steigendem Bedarf nach forstlicher Biomasse und begrenztem inländischen Potenzial vermehrt Nutzungskonkurrenzen mit stofflichen Verwendungen und steigende Importabhängigkeiten zu erwarten sind, sollte das Leitszenario des BMU auf der Basis einen umfassenden Biomassekonzepts und unter Würdigung der in- und ausländischen Flächennutzungen überprüft werden.

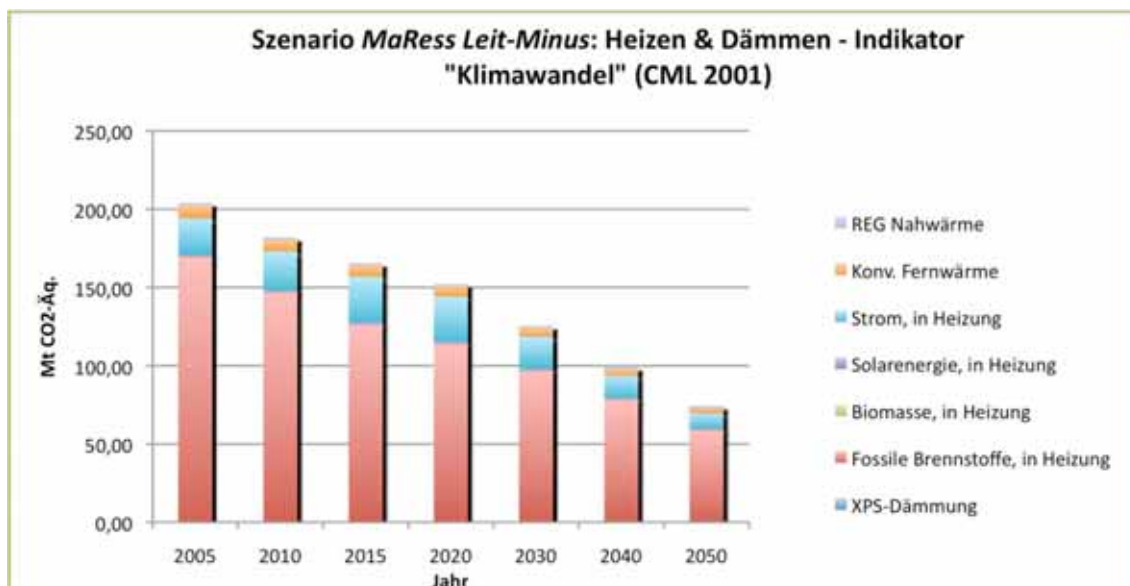
Abb. 7-7: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Landverbrauch“ im Szenario *MaRes Leit-Minus*



Quelle: Eigene Modellberechnung

Das absolute Treibhauspotenzial sinkt im Szenario *MaRes Leit-Minus* etwas deutlicher von 204 Mt CO₂-Äq. in 2005 auf 75 Mt in 2050 – unter ebenfalls vernachlässigbarem Einfluss der Dämmstoff-Herstellung von maximal 482 kt in 2040 (vergleiche Abb. 7-8).

Abb. 7-8: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario *MaRes Leit-Minus*

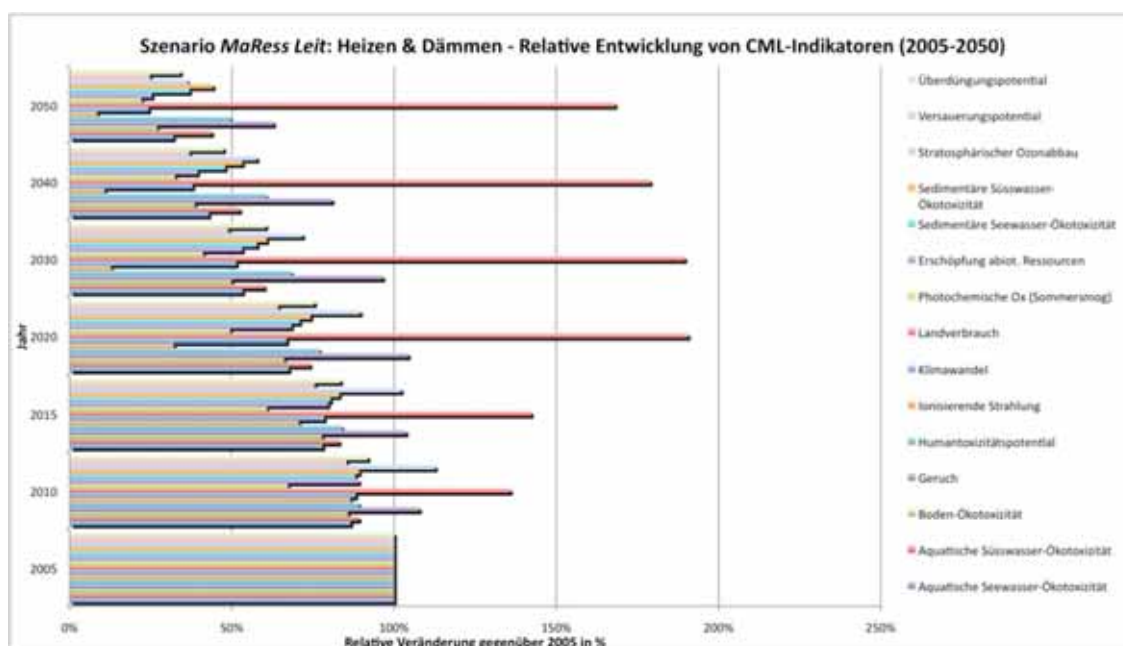


Quelle: Eigene Modellberechnung

Szenario *MaRess Leit*

Abb. 7-9 zeigt die relative Entwicklung des CML-Indikatorensets im Szenario *MaRess Leit*. Das Szenario weist im Vergleich zu *MaRess Leit-Minus* einen noch stärkeren Rückgang der meisten Indikatoren um 60-75% bis 2050 gegenüber 2005 auf.

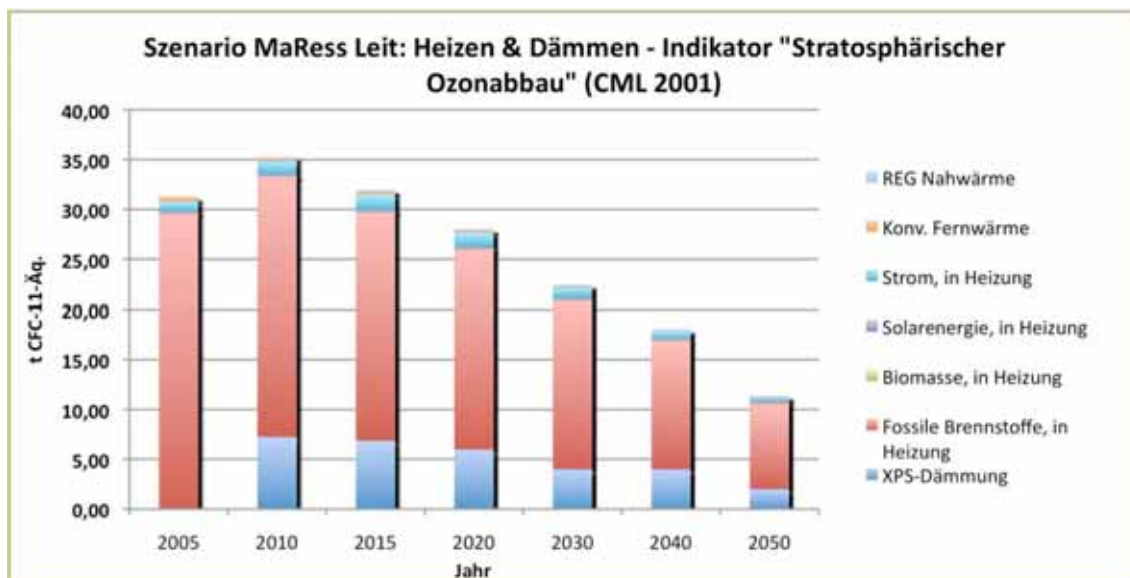
Abb. 7-9: Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario *MaRess Leit*



Quelle: Eigene Modellrechnungen

Durch Abweichungen von diesem Trend zeigen sich auch hier verstärkte Trade-off Effekte zwischen verschiedenen Umweltwirkungen: Tendenz und Ursachen für den zwischenzeitlichen Anstieg des Indikators „Geruch“ sind vergleichbar mit Szenario *MaRess Leit-Minus*, wobei die schneller schwindende Abhängigkeit von fossilen Heizenergiequellen hier einen schnelleren Rückgang ab 2030 verursacht. Auch der Landverbrauch zeigt einen ähnlichen Trend wie in *MaRess Leit-Minus*, der sich aber im Vergleich durch größere Endenergie-Anteile der Biomasse-Heizungen von zum Beispiel 90 PJ (Leit) statt 62 PJ (Leit-Minus) in 2020 noch ausgeprägter darstellt. Auch der grundsätzlich durch die Nutzung fossil befeuerter Heizungen dominierte Indikator „Stratosphärischer Ozonabbau“ steigt auf Grund zusätzlicher prozessbedingter Emissionen der Herstellung von XPS-Dämmstoffen zwischenzeitlich leicht über den Wert des Basisjahres 2005, sinkt dann aber bis 2050 deutlich um 64% des Bezugswertes (siehe Abb. 7-10).

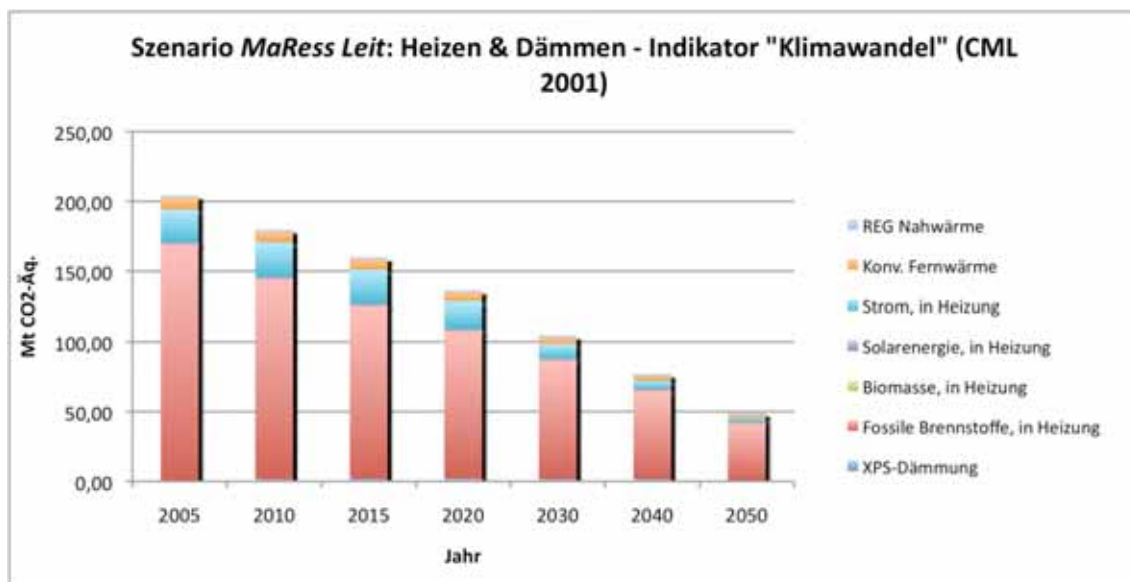
Abb. 7-10: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Stratosphärischer Ozonabbau“ im Szenario *MaRes Leit*



Quelle: Eigene Modellberechnung

Das absolute Treibhauspotenzial sinkt gemäß Abb. 7-11 im Szenario *MaRes Leit* von 204 Mt CO₂-Äq. in 2005 auf 50 Mt in 2050 – unter geringem Einfluss der Dämmstoff-Herstellung von maximal etwa 2 Mt in 2020.

Abb. 7-11: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario *MaRes Leit*



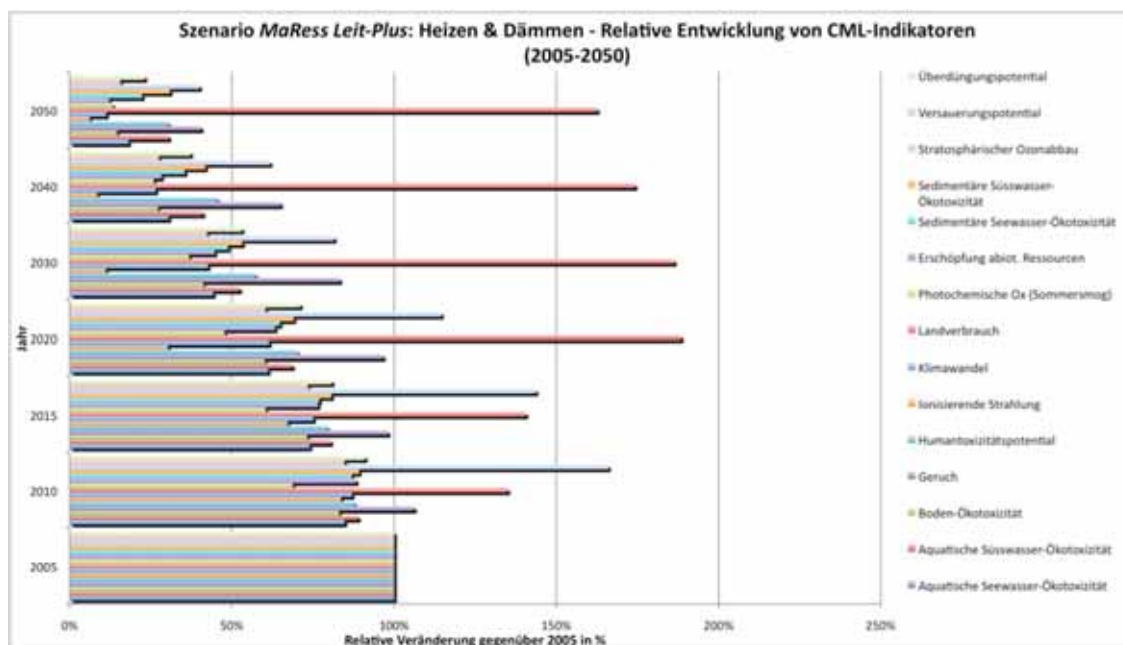
Quelle: Eigene Modellberechnung

Szenario *MaRes Leit-Plus*

Abb. 7-12 zeigt die relative Entwicklung des CML-Indikatorensets im Szenario *MaRes Leit-Plus*. Der Rückgang eines Großteils der Indikatoren fällt hier nochmals stärker aus als im Szenario *MaRes Leit* und liegt in den meisten Fällen bei 70-90% bis 2050 gegenüber dem Basisjahr 2005

Durch zwischenzeitliche Zunahmen (aber letztendlich auch eine deutliche Reduktion der jährlichen Emissionen über den zeitlichen Modellhorizont) sind auch in diesem Szenario die Indikatoren „Geruch“ und „Stratosphärischer Ozonabbau“ gekennzeichnet. Auf Grund der zusätzlichen Dämmstofftonnagen, die in diesem Szenario verbaut werden, fällt die zwischenzeitliche Steigerung des Ozonabbaupotenzials dabei zwischen 2010 und 2020 zunächst deutlicher aus als in *MaRes Leit*. Durch die Einsparung von fossiler Heizenergie auf Grund der Dämmung wird dieser Effekt aber schon ab 2030 kompensiert, so dass sich die Werte dieses Indikators der beiden Szenarien im Zeitraum 2030 bis 2050 weitgehend gleichen. Da der Einsatz von Biomasse in der regenerativen Wärme-Einzelsversorgung im Szenario *MaRes Leit* und *Leit-Plus* identisch ist, ergibt sich auch hier in annähernd identischer Form der bereits geschilderte Trade-off des Indikators „Landverbrauch“.

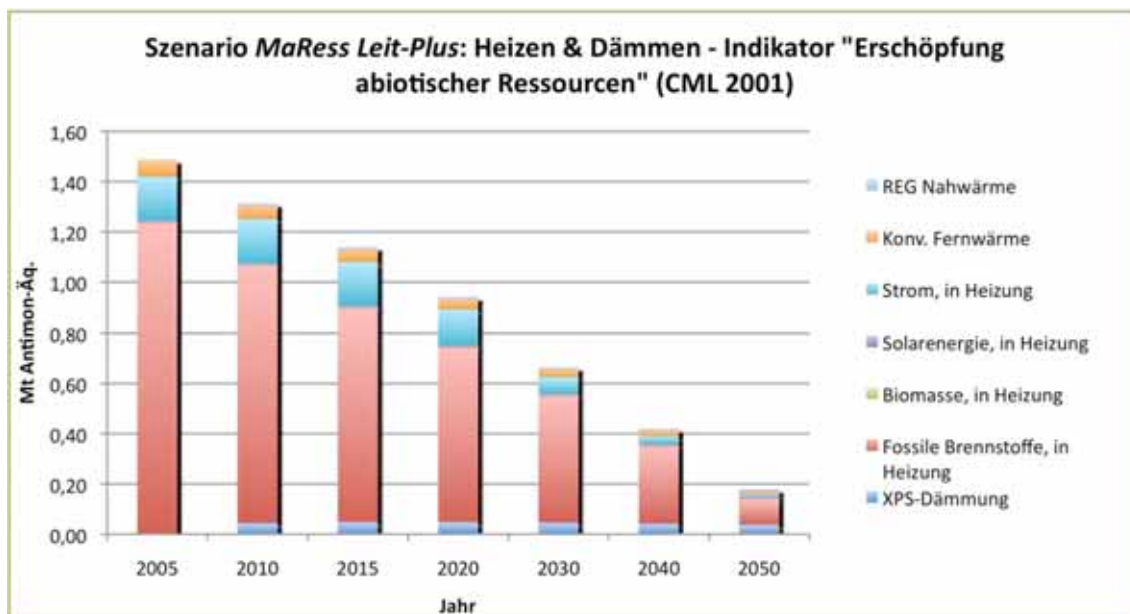
Abb. 7-12: Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario *MaRes Leit-Plus*



Quelle: Eigene Modellrechnungen

Abb. 7-13 zeigt, dass der massive Einsatz von Dämmstoffen in diesem Szenario zwar zum Indikator „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ beiträgt, diesen aber – im Gegensatz zur Nutzung fossiler Energiequellen zu Heizzwecken – mit einem Anteil von 3% in 2010 und 10% in 2050 nicht maßgeblich beeinflusst.

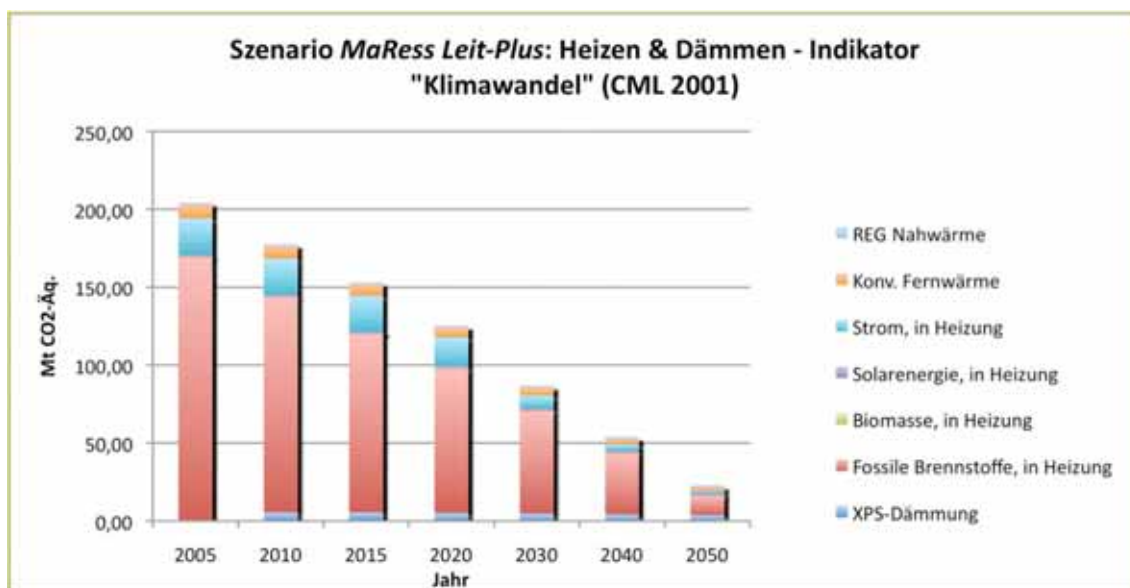
Abb. 7-13: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ im Szenario *MaRes Leit-Plus*



Quelle: Eigene Modellberechnungen

Das absolute Treibhauspotenzial sinkt im Szenario *MaRes Leit-Plus* von 204 Mt CO₂-Äq. in 2005 auf nur noch 23 Mt in 2050. Erstmals kommt dabei der Bereitstellung des XPS-Dämmstoffs ein in der Skalierung der Grafik erkennbarer Anteil zu, der aber auch bis 2050 trotz des hohen Rückgangs der Heizemissionen nicht über 17% der gesamten residualen THG-Emissionen des Systems ansteigt (vergleiche Abb. 7-14).

Abb. 7-14: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario *MaRes Leit-Plus*

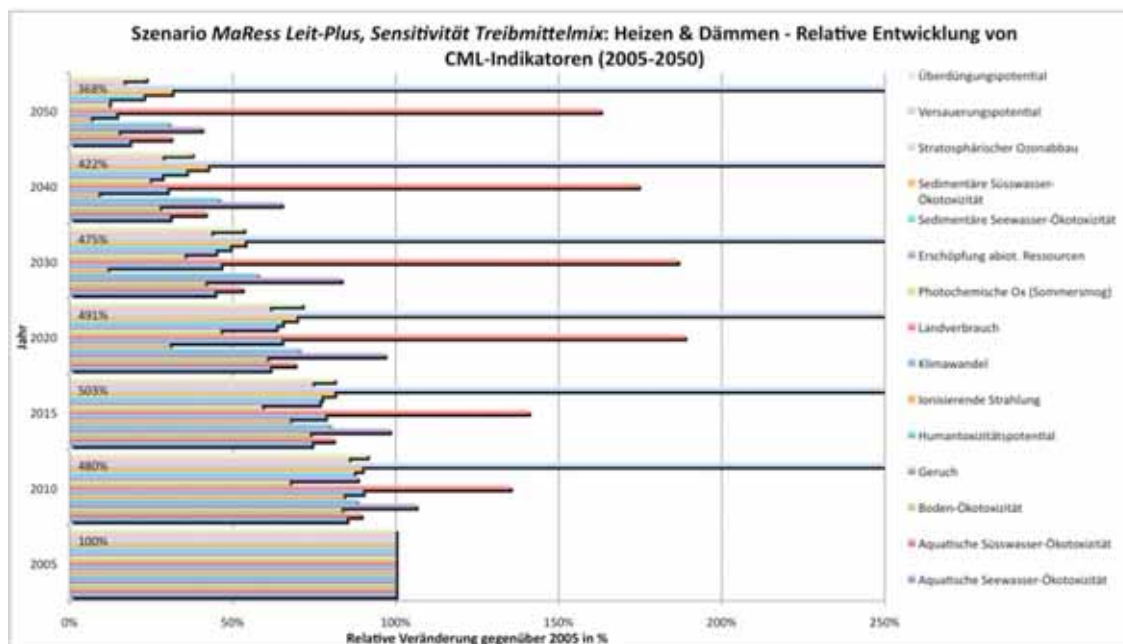


Quelle: Eigene Modellberechnungen

Szenario *MaRes Leit-Plus*, Sensitivität Treibmittel XPS

Für das Szenario *MaRes Leit-Plus* wurde eine Sensitivitätsrechnung durchgeführt, die das Ausmaß der Abweichungen von Indikator-Werten bei verändertem Treibmittelmix in der Herstellung von XPS-Dämmstoffen darstellt (siehe Kapitel 5.4.1). Die relative Entwicklung des CML-Indikatorensets dieser Sensitivität ist in Abb. 7-15 dargestellt.

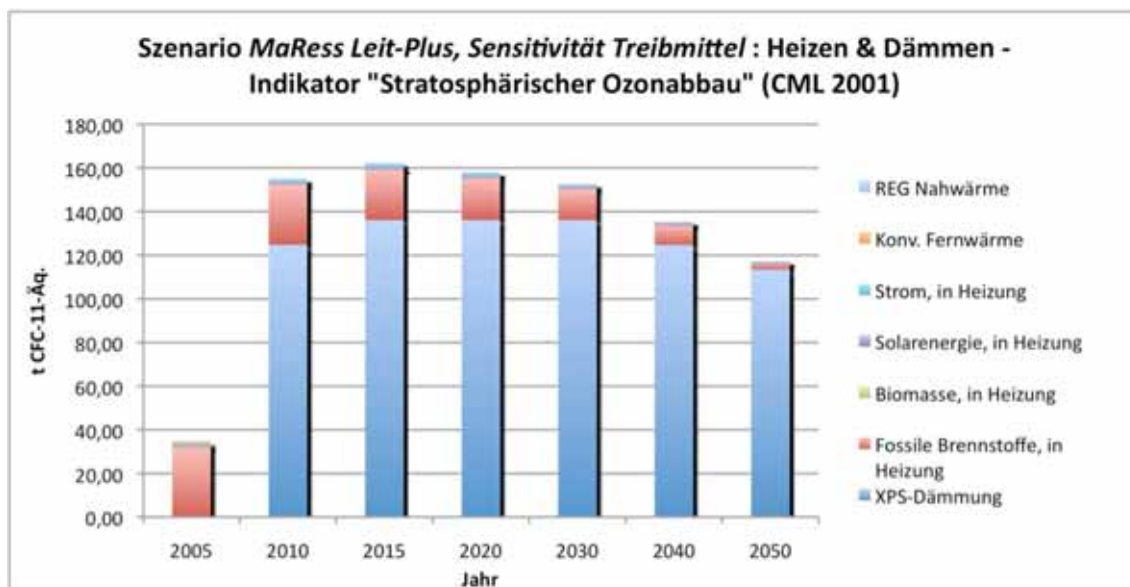
Abb. 7-15: Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario *MaRes Leit-Plus* (Sensitivität Treibmittel) – Werte zwischen 250 und 500% abgeschnitten



Quelle: Eigene Modellrechnungen

Überdeutlich lässt die Abbildung einen erheblichen Trade-off zwischen vielfältigen reduzierten Umweltwirkungen als Folge insbesondere der Heizenergieeinsparung einerseits und des „Stratosphärischen Ozonabbaus“ andererseits erkennen: Da die grafische Darstellung des Ozonabbaupotenzials den Wertebereich übersteigt, der zur Vergleichbarkeit aller Szenarien untereinander gewählt wurde, sind die Zahlenwerte der relativen Entwicklung dieses Indikators an der Basis der Diagrammbalken aufgetragen. Sie erreicht in 2015 ein Maximum von 503% des Niveaus im Basisjahr und liegt im Jahr 2050 bei 368%. Die absolute Entwicklung des Ozonabbaupotenzials ist zudem auch in Abb. 7-16 dargestellt. Sie bedeutet nicht zwangsläufig, dass auch im Relation zu Grenzwerten oder nationalen Emissionsstatistiken ein hohes Emissionsniveau erreicht wird. Vielmehr kann es sich auch um einen Hinweis darauf handeln, dass in anderen Prozessketten, die Bestandteil des Stoffstrommodells sind, weitgehend auf die Freisetzung ozonabbauender Substanzen verzichtet wird.

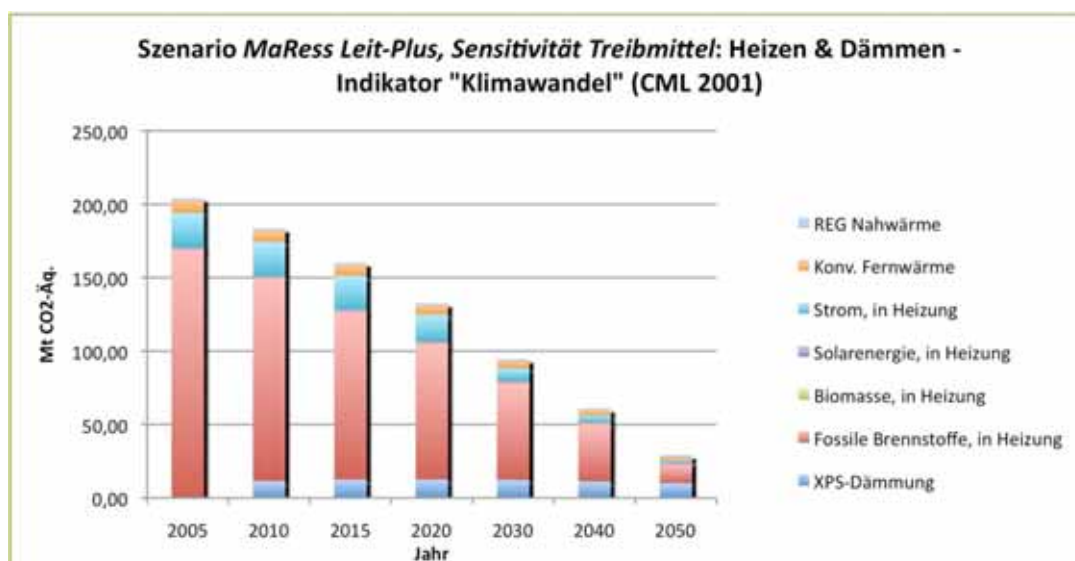
Abb. 7-16: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Stratosphärischer Ozonabbau“ im Szenario *MaRes Leit-Plus* (Sensitivität Treibmittel)



Quelle: Eigene Modellberechnungen

Die relativen Veränderungen weiterer Indikatoren im Vergleich zur Basisvariante des Szenarios *MaRes Leit-Plus* sind dagegen marginal. Dies trifft auch auf den Indikator „Klimawandel“ zu: Die Treibhausgas-Emissionen der XPS-Herstellung fallen in der relativen Betrachtung im Vergleich zu Emissionen der Gebäudebeheizung nur wenig ins Gewicht. Dennoch zeigt die Darstellung der absoluten CO₂-Äquivalente des Systems in Abb. 7-17 einen deutlichen Zuwachs der Sensitivität: Die XPS-Herstellung leistet hier zum Indikatorwert einen maximalen Beitrag von 12,7 Mt CO₂-Äq. in 2015 im Vergleich zu 5,7 Mt in der Basisvariante von *MaRes Leit-Plus*. Die Treibmittel-Auswahl ist deshalb grundsätzlich auch aus Perspektive des Klimaschutzes von Bedeutung.

Abb. 7-17: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario *MaRes Leit-Plus* (Sensitivität Treibmittel)

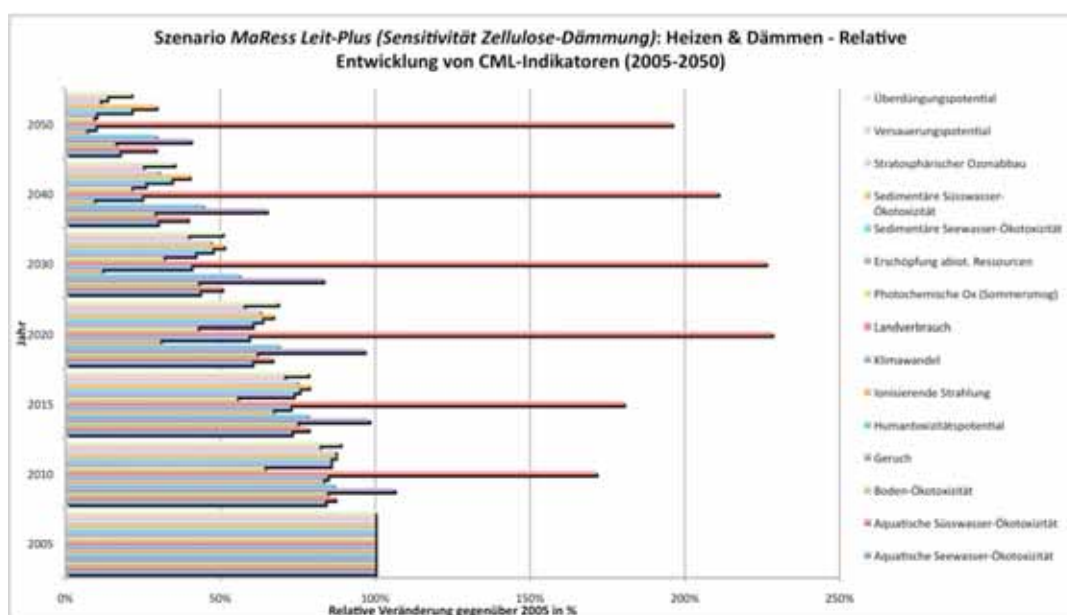


Quelle: Eigene Modellrechnungen

Szenario *MaRes Leit-Plus*, Sensitivität Zellulose-Dämmung

Eine weitere Sensitivitätsrechnung im Szenario *MaRes Leit-Plus* zeigt das Ausmaß der Abweichungen von Indikator-Werten bei Einsatz von Zellulose-Flocken (aus Altpapier) an Stelle von XPS in der energetischen Gebäudesanierung. Die relative Entwicklung des CML-Indikatorensets dieser Sensitivität ist in Abb. 7-18 dargestellt.

Abb. 7-18: Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario *MaRes Leit-Plus* (Sensitivität Zellulose-Dämmung)

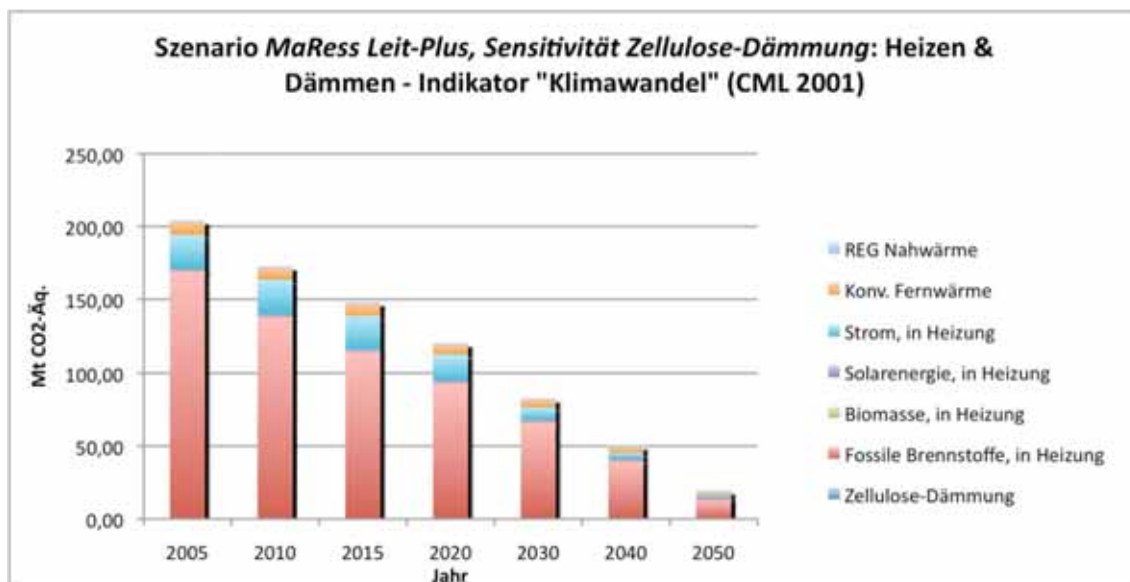


Quelle: Eigene Modellrechnungen

Der Vergleich mit der Basisvariante des Szenarios *MaRes Leit-Plus* zeigt erwartungsgemäß, dass zuvor erkennbare Trade-off Effekte im Bereich des „Stratosphärischen Ozonabbaus“ hier entfallen, da die Herstellung der Zelluloseflocken keinen Treibmitteleinsatz erforderlich macht. Der entsprechende Indikator folgt dem generellen Trend eines kontinuierlichen Rückgangs und erreicht bis 2050 eine Reduktion um 89% im Vergleich zu 2005. Während die Entwicklung des Indikators „Geruch“ durch die Zellulose-Nutzung unverändert bleibt, ergibt sich eine noch stärkere Ausprägung des Trade-offs „Landverbrauch“: Dieser kommt durch die Einbeziehung von Verpackungs- und Transportmaterial in Form von Euro-Flachpaletten und ungebleichtem Kraftpapier aus Holzzellstoff zu Stande, die zu drei Viertel beziehungsweise einem Viertel zum Landverbrauch der Zelluloseflocken beitragen. Der Herstellung des eigentlichen Dämmstoffs aus Altpapier als Abfallprodukt wird dagegen keine Umweltwirkung der Bereitstellung zugeordnet.

Alle weiteren Indikatoren erfahren durch die Verwendung von Zellulose statt XPS nur einen geringfügigen positiven Effekt, der sich in einer weiteren leichten Abnahme um jeweils etwa 1-4%-Punkte in 2050 unter das Niveau der Basisvariante des Szenarios *MaRes Leit-Plus* ausdrückt. Dies gilt auch für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen, die bis 2050 auf 19,6 Mt pro Jahr sinken und damit den niedrigsten Wert im Vergleich aller betrachteten Szenarien erreichen (Abb. 7-19).

Abb. 7-19: Absolute Entwicklung des CML-Indikators „Klimawandel“ im Szenario *MaRes Leit-Plus* (Sensitivität Zellulose-Dämmung)



Quelle: Eigene Modellberechnungen

7.3 Trade-off Analyse der Materialintensität mittels MIPS am Beispiel der Dämmstoffe XPS und Zellulose

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, steht in Standardsoftware-Paketen zur Ökobilanzierung bisher kein Ressourcenindikator im Sinne von TMR oder MIPS zur Verfügung. Andererseits existiert bisher keine geeignete Modellumgebung inklusive entsprechend aufbereiteter und reviewter TMR- oder MIPS-Daten, mit der das hier entwickelte Bottom-up Wirkungsanalyse Modell hätte gekoppelt werden können. Die Nutzung der in Ökobilanzen existierenden Ressourcenkategorien ist somit ein erster Schritt, um überhaupt Analysen wie die hier erfolgten Trade-off-Abschätzungen durchführen zu können.

Um dennoch auf eine erweiterte Ressourcenbetrachtung eingehen zu können, wird im Folgenden beispielhaft und ohne Modellumgebung eine Trade-off Analyse mittels des MIPS-Indikatorensets durchgeführt. Das MIPS-Konzept wurde vom Wuppertal Institut entwickelt und stellt den „Ökologischen Rucksack“ eines Produktes oder einer Serviceleistung dar (gemessen in MIPS-Einheiten = Material Input per Service Unit). Beachtet werden sollte jedoch, dass diese Vorgehensweise nur eine statische Analyse auf Basis nicht-reviewter Daten darstellt, da ein einmal ermittelter MIPS-Faktor verwendet wird, ohne Veränderungen der Herstellungsverfahren des betrachteten Produktes und seiner Vorketten in der Zukunft zu berücksichtigen.

Die Analyse wird am Beispiel der beiden Dämmvarianten XPS und Zellulose durchgeführt, so dass einerseits der Trade-off zwischen zusätzlicher Dämmung und vermiedenen Nutzenergieverbrauch, andererseits ein Vergleich der beiden Dämmvarianten analysiert werden kann. Die bei den unterschiedlichen Dämmvarianten benötigten Materialmengen wurden bereits in Abb. 7-16 dargestellt. Abb. 7-17 zeigt die jeweiligen MIPS-Faktoren der beiden Dämmstoffe (und zum Vergleich diejenigen einiger anderer Baustoffe).

Tab. 7-17: MIPS-Verrechnungsfaktoren von XPS und Zellulose sowie anderer Bau- und Dämmstoffe

| Baustofftabelle und MIPS-Verrechnungsfaktoren | | | | | | |
|---|--------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------|-----------------------|
| ID | Dichte | | MIPS - Grunddaten | | | |
| (unique num) | kg/m³ | | Nicht nachwachsende Rohstoffe | Nachwachsende Rohstoffe | Wasser | CO ₂ -Äqu. |
| | | | kg/kg | kg/kg | kg/kg | kg/t |
| 68 | 60 | Zellulose | 1,7 | 0,0 | 6,70 | 384,0 |
| 611 | 30 | XPS | 2,5 | 0,0 | 164,00 | 5980,0 |
| Vergleichswerte | | | | | | |
| 63 | 30 | Polystyrol(PS)-Hartschaum | 2,5 | 0,0 | 164,00 | 6640,0 |
| 64 | 30 | Polyurethan(PUR)-Hartschaum | 6,3 | 0,0 | 505,10 | 6540,0 |
| 65 | 30 | Phenolharz(PF)-Hartschaum | 3,2 | 0,0 | 18,70 | 4,0 |
| 66 | 250 | Mineralwolle | 4,0 | 0,0 | 39,70 | 1430,0 |
| 67 | 125 | Schaumglas | 6,7 | 0,0 | 152,60 | 1190,0 |
| 69 | 700 | Hochofenschlacke, Blähton | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 237,4 |
| 610 | 100 | Glaswolle | 4,7 | 0,0 | 46,00 | 1470,0 |

Quelle: Wuppertal Institut (2009)

In Tab. 7-18 und Tab. 7-19 sind die jeweiligen Ergebnisse der MIPS-Berechnungen dargestellt. Hier ist auf die folgenden MIPS-Kategorien eingegangen worden:

1. Abiotisches Material (nicht nachwachsende Rohstoffe),
2. Biotisches Material (nachwachsende Rohstoffe),
3. Wasser,
4. CO₂-Äquivalente und
5. Primärenergieaufwand

Neben der Darstellung der kumulierten Energieeinsparung in Teil-Tabelle (1) des Bilanzzeitraumes 2005 bis 2050 sind in Teil-Tabelle (2) die Ergebnisse der MIPS-Berechnung des jeweiligen Dämmstoffes enthalten. Dem werden in Teil-Tabelle (3) MIPS-Werte gegenüber gestellt, die durch die vermiedenen Brennstoffe ausgelöst werden. Da nach fortschreitender Szenariodauer und ansteigender Sanierung die Wirkung der jeweiligen Sanierungsmaßnahme über ihre gesamte Lebensdauer erhalten bleibt, ist im gesamten Szenariohorizont eine Brennstoffeinsparung von rund 23.900 PJ erzielt worden, die durch ein Heizsystem im Zeitraum 2005-2050 nicht mehr gedeckt werden muss. Legt man den entstehenden Brennstoff-Mix zugrunde und berechnet man die daraus resultierenden MIPS, ergeben sich die Werte der Teil-Tabelle (3).

Teil-Tabelle (4) schließlich stellt den Saldo der durch die verwendeten Dämmstoffe zusätzlich ausgelösten Belastung und der durch die vermiedenen Brennstoffeinsparung resultierenden Einsparungen dar. Negative Werte, die sich in den allermeisten Fällen ergeben und mit fortschreitender Sanierung erheblich zunehmen, bedeuten eine Kompensation der zusätzlichen Materialeinsatzes durch Energieeinsparung.

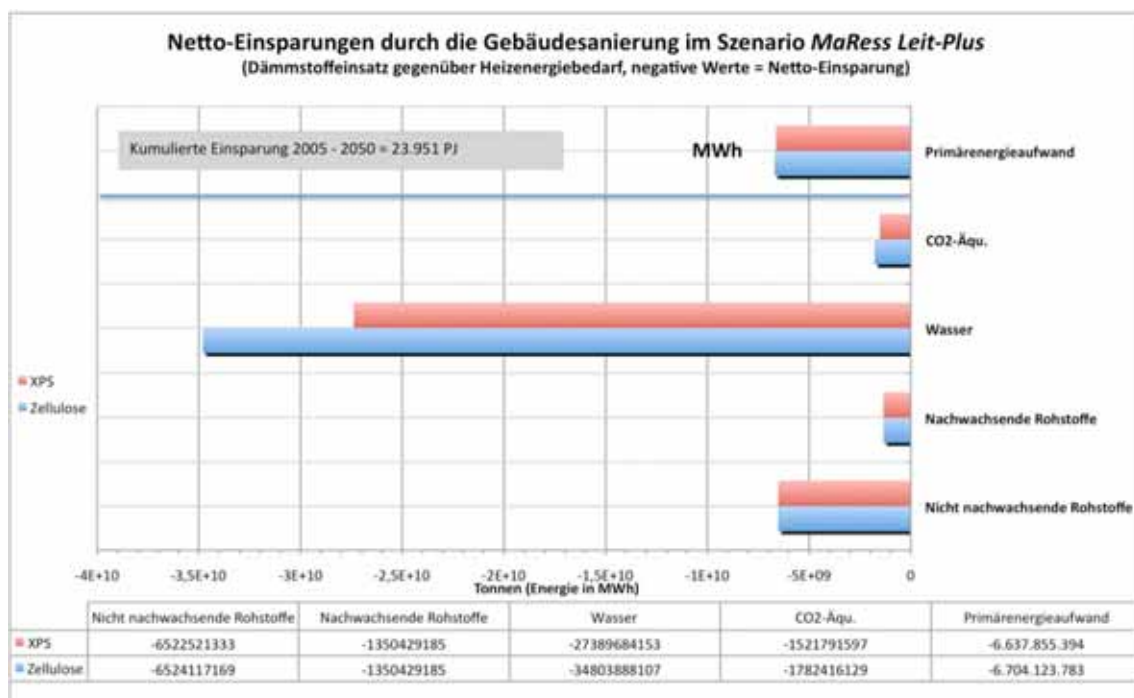
Tab. 7-18: Ergebnisse der MIPS-Berechnung und Trade-off Analyse für den Dämmstoff XPS im Szenario *MaResS Leit-Plus*

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|---------|-------------------------------------|----------------------------|---|------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---|-----------|--|-------------------------------------|----------------------------|--|------------|-------------------------|--|--|
| Tabelle (1) enthält Emissionen, die durch Maßnahmen im Letztverarbeitungs-Plus erzielt sind. | (1) Ergebnisse der ENERGIE-Bilanzierung nach HEAT in PJT | | | | | (2) HIPS durch Einsatz von Glukosestoffen KPS im Letztverarbeitungs-Plus | | | | | (3) Verminderte HIPS (Einsparung Hitzestoffen) durch Einsatz von Glukosestoffen KPS im Letztverarbeitungs-Plus | | | | | (4) HIPS (HIPS-/Hitzestoffe) von KPS-HIPS gegenüber der eingesetzten Hitzestoffe | | | | |
| | [PJ] | Kumuliertes Nettovermögen Emissionen im Letztverarbeitungs-Plus durch Wärmerückgewinnung (PJ) im Zeitraum 2005 - 2020 | | Netto nachwachsende Rohstoffe | Nachwachsende Rohstoffe | Wasser | CO2-Äq. | st. Energie (Brennstoff) | Netto nachwachsende Rohstoffe | Nachwachsende Rohstoffe | Wasser | CO2-Äq. | Eingesetzte Energie/Brennstoff tJt | Netto nachwachsende Rohstoffe | Nachwachsende Rohstoffe | Wasser | CO2-Äq. | Energie (Brennstoff) | | |
| Tabelle (2) enthält -nachweislich- die HIPS/THM aus den vorher identifizierten Bilanzierungsschritten | 2010 | 338 | | 13.136 | 0 | 858.274 | 31.296 | 7.452.333 | 57.192 | 3.059 | 571.090 | 30.656 | 94.021.859 | -44.056 | -3.059 | 287.184 | 637 | -86.508.626 | | |
| | 2015 | 912 | | 14.330 | 0 | 936.299 | 34.141 | 8.129.817 | 179.867 | 17.937 | 1.335.108 | 86.475 | 255.368.664 | -165.537 | -17.937 | -888.809 | -50.334 | -347.238.647 | | |
| | 2020 | 1.514 | | 14.330 | 0 | 936.299 | 34.141 | 8.129.817 | 317.644 | 38.099 | 2.840.361 | 133.952 | 423.995.190 | -303.314 | -38.099 | -1.964.062 | -98.511 | -415.865.373 | | |
| | 2030 | 4.818 | | 28.660 | 0 | 1.877.598 | 68.281 | 16.259.635 | 1.668.894 | 215.304 | 7.472.889 | 391.084 | 1.340.061.816 | -1.041.236 | -215.304 | -5.600.290 | -323.403 | -1.333.802.181 | | |
| | 2040 | 7.097 | | 26.272 | 0 | 1.716.549 | 62.591 | 14.304.665 | 1.846.682 | 469.122 | 10.379.638 | 546.309 | 1.387.385.232 | -1.812.411 | -409.122 | -8.663.090 | -477.718 | -1.872.366.587 | | |
| 2050 | 8.273 | | 23.883 | 0 | 1.560.499 | 56.901 | 13.549.696 | | 3.188.932 | 667.000 | 12.171.116 | 628.964 | 2.596.568.696 | -3.144.960 | -667.000 | -18.618.618 | -572.063 | -2.183.019.000 | | |
| Summe im Bilanz- rahmen 2005 - 2050 | 23.051 | | 120.610 | 0 | 7.880.518 | 387.211 | 68.425.963 | | 6.643.132 | 1.310.429 | 38.270.202 | 1.809.147 | 6.706.381.357 | -4.532.521 | -1.310.429 | -27.389.684 | -1.531.792 | -6.437.835.394 | | |

Quelle: Eigene Modellrechnungen

Betrachtet man neben den Wirkungsindikatoren aus der Ökobilanzierung auch das Ressourcenindikatoren-Set MIPS, so wird deutlich, dass Varianten des Szenarios MaRes *Leit-Plus* mit XPS- und Zellulose-Dämmung mit vergleichbaren Auswirkungen auf die Materialintensität verbunden sind. Die kumulierten Nettoeffekte, die sich hier aus dem Dämmstoffeinsatz in Gegenüberstellung mit der Einsparung von Heizenergie ergeben, werden in Abb. 7-20 dargestellt. Sie umfassen eine Abschätzung der Salden des Primärenergieaufwandes, der Treibhausgasemissionen sowie des Bedarfs an Wasser, biotischen und abiotischen Rohstoffen. Die negativen Indikatorwerte zeigen dabei an, dass durch die Dämmwirkung und den damit verbundenen starken Heizenergieerückgang in beiden Fällen die Material-Mehrverbräuche durch die Einsparungen überkompensiert werden.

Abb. 7-20: Ergebnisse der Trade-off Analyse (Ressourceneinsatz versus Einsparungen) der Dämmstoffvarianten XPS und Zellulose



Quelle: Eigene Modellrechnungen

Trotz seines durch die höhere Dichte ausgelösten direkten Materialmehraufwandes ist der Dämmstoff Zellulose in der gesamten Prozesskette geringfügig weniger materialintensiv als der feinporigere extrudierte Polystyrol-Hartschaum XPS. Dies zeigt sich besonders beim Wasserverbrauch. Zusammenfassend lässt sich aber festhalten, dass ambitionierte Dämmstoffstrategien sowohl mittels XPS als auch Zellulose im Hinblick auf alle in diesem Arbeitsschritt analysierten Faktoren einen wesentlichen Beitrag sowohl zu Materialeffizienz- als auch zu Emissionsminderungszielen leisten.

Grundsätzlich können sich bei der Verwendung holzbasierter Dämmstoffe Konkurrenzsituationen ergeben. Im Fall der Zellulose wäre aber selbst bei einer Vollsanierung bis

2050 ausschließlich auf Basis dieses Dämmstoffes gemäß Abb. 7-3 mit einem Aufwand von durchschnittlich etwa 1,2 Millionen Tonnen Altpapier pro Jahr zu rechnen. Dies entspricht ca. 8% des inländischen Altpapieraufkommens in 2007 von 15,4 Millionen Tonnen (VDP 2010). In einem realitätsnahen Dämmstoffmix sind Nutzungskonkurrenzen mit der Recyclingpapier-Herstellung und indirekte Flächenkonkurrenzen um forstliche Ressourcen daher eher als gering einzuschätzen, aber dennoch im Rahmen der Festlegung einer Dämmstoffstrategie zu prüfen.

8 Schlussfolgerungen, Politikempfehlungen und Forschungsbedarf

8.1 Schlussfolgerungen und Politikempfehlungen

Die Modellierung innerhalb des AS6.2 hat eine Vielzahl neuer Erkenntnisse erbracht. Die drei zentralen Ergebnisse auf methodischer Seite sind

- die Entwicklung des Bottom-up Wirkungsanalyse-Modells und die beispielhafte Anwendung auf das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“,
- die erstmals durchgeführte Trade-off Analyse zwischen Effizienzsteigerung, Ressourcenverbrauch und Emissionswirkungen und
- die dadurch möglich gewordene Erweiterung „reiner“ Energieszenarien um ressourcenpolitische Analysen.

Das zentrale Ergebnis der Modellanalyse ist, dass zusätzliche Aufwendungen für Dämmstoffe sowohl ressourcen- als auch emissionsseitig in fast allen Umweltwirkungskategorien durch erhebliche Einsparungen bei der Gebäudebeheizung überkompensiert werden. Im Wesentlichen sind keine Trade-offs erkennbar, und der prozentuale Beitrag der Dämmstoffe an den Umweltwirkungsindikatoren ist gering. Relevante Auswirkungen sind nur im Fall erhöhter Anteile von Biomasse-Heizanlagen erkennbar, da eine verstärkte Biomassenutzung negative Auswirkungen auf den Indikator für Flächenverbrauch hat.

Vergleicht man die Entwicklung der Umweltwirkungen entlang der vier Szenarien, so wird deutlich, dass schon im Referenzfall, dem Szenario *MaRess BAU*, ein kontinuierlicher, aber moderater Netto-Rückgang aller betrachteten Wirkungskategorie-Indikatoren in Höhe von jeweils 30-50% bis 2050 im Vergleich zu 2005 zu beobachten ist. Dieser Rückgang steigt erwartungsgemäß bei forcierter Ressourcen- und Klimapolitik mehr und mehr an und erreicht im Szenario *MaRess Leit-Plus* im gleichen Zeitraum 70-90% Netto-Entlastung.

Relevant ist die Wahl des Treibmittels bei den aufgeschäumten XPS-Dämmstoffen: Für die Basisanalyse wurde angenommen, dass 90-96% des in Deutschland verwendeten XPS mittels CO₂ aufgeschäumt wird und der Rest jeweils zur Hälfte durch die Fluorkohlenwasserstoffe FKW 134a und FKW 152a abgedeckt wird. Da dies in anderen Ländern erheblich abweichen kann, wurde in einer Sensitivitätsanalyse eine Treibmittel-Zusammensetzung von 50% CO₂ und jeweils 25% FKW 134a und FKW 152a angenommen. Im Endergebnis führt dies zu einem erheblichen Trade-off bezüglich der Wirkungskategorie „Stratosphärischer Ozonabbau“ (die Belastung durch die Dämmung übersteigt die Entlastung durch die entsprechende Energieeinsparung um 500% in 2015 und geht auf 368% in 2050 zurück) und zu einer erkennbaren, jedoch nicht so deutlichen Wirkung auf das Treibhaus-Potenzial.

Die Sensitivitätsanalyse mit dem alternativen Dämmmaterial Zellulose hat gezeigt, dass sich die an sich schon geringen Anteile der Dämmstoffe an den Wirkungsindikatoren weiter verringern. Erweitert man diese Betrachtung der Ökobilanzierung auf das Ressourcenindikatoren-Set MIPS, so wird deutlich, dass XPS- und Zellulose-Dämmung mit vergleichbaren Auswirkungen auf die Materialintensität verbunden sind. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für beide Materialien ambitionierte Dämmstoffstrategien im Hinblick auf alle in diesem Arbeitsschritt analysierten Faktoren einen wesentlichen Beitrag sowohl zu Materialeffizienz- als auch zu Emissionsminderungszielen leisten.

Die berechneten Materialintensitäten sind jedoch nur als erste Analyse zu verstehen. Für eine umfassende Bewertung sind eine einheitliche Produkt-Datenbasis mit aktualisierten, reviewten und auf die Zukunft fortschreibbaren Datensätzen und Indikatoren notwendig. Die Einbettung eines umfassenden Ressourcenindikators in das etablierte Instrumentarium der Szenarien- und Stoffstromanalyse ist eine weitere Herausforderung, die innerhalb dieses Pilotprojekts deutlich wurde und die aufgrund der begrenzten zeitlichen Kapazität nicht gelöst werden könnten.

Eine andere, wesentliche Einschränkung hat sich durch die Schwierigkeiten ergeben, konkrete ressourcenpolitische Instrumente zu definieren. Keiner der von den Politik-AP 3, 4 und 12 identifizierten Ressourcenpolitik-Ansätze konnte direkt auf den hier modellierten Bereich der Sanierung von Wohngebäuden angewendet werden. Es wurde deutlich, dass hinsichtlich der Verbindung der Szenarienentwicklung und der Stoffstrommodellierung mit der Konkretisierung von wohnraumspezifischen Instrumenten weiterer Forschungsbedarf besteht.

Da die energetischen Ressourcen jedoch einen wesentlichen Anteil an den Umweltauswirkungen des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“ haben, konnte in einem ersten Schritt die detaillierte Modellierung energie- und klimapolitischer Ansätze in Verbindung mit einer Ressourcenpolitik (insbesondere im Hinblick auf die Gebäudedämmung) durchgeführt werden. Dies stellt eine erhebliche Erweiterung bisheriger „reiner“ Energieszenarien dar, die nicht auf die Ressourcenseite fokussiert sind und in der Regel emissionsseitig nur Treibhausgasemissionen betrachten.

Die dargestellten Ergebnissen führen zu folgenden Politikempfehlungen:

- Energieeinspar- und Effizienzstrategien, wie sie in den verwendeten MaRes-Szenarien, die auf dem BMU-Leitszenario 2008 aufbauen, modelliert wurden, sollten zügig umgesetzt werden. Entsprechende politische Vorgaben hätten eine positive Wirkung auf fast alle Umweltwirkungskategorien, insbesondere den stofflichen Ressourcenverbrauch und fast alle Emissionsindikatoren.
- Der erhöhte Flächenverbrauch, der sich (indirekt) aus der Zunahme von Biomasse-Heizanlagen ergibt, sollte bei der Umsetzung einer Erneuerbare-Energien-Strategie bedacht werden. Hierzu bedarf es einer umfassenden Biomassestrategie, die den Einsatz für Ernährung, Materialien und Energie gemeinsam betrachtet und die inländische und ausländische Flächennutzung berücksichtigt.

- Aufgrund des erheblichen Trade-offs, der sich ergibt, wenn der Dämmstoff XPS nicht mit CO₂, sondern mit Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) aufgeschäumt wird, sollte industriepolitisch auf eine weitere Reduktion der FKW in Dämmstoffen hingewirkt werden. Während in Deutschland bereits weitgehend CO₂ verwendet wird (angenommen wurde ein Anteil von 90-96%), betrifft dies insbesondere Dämmstoffe, die in anderen Ländern der EU hergestellt werden.
- Nicht nur bei Dämmstoffen, sondern generell bei Baustoffen sollten vertieft die Ressourcenauswirkungen ihrer Herstellung analysiert werden und in industriepolitische Instrumente einfließen.
- Es sollte darauf hingewirkt werden, dass ein standardisierbarer Bilanzierungsansatz entwickelt wird, der die bestehende Ökobilanz-Methodik mit umfassenden stofflichen Ressourcenindikatoren koppelt. Weiterhin sollten aktuelle, harmonisierte, reviewte und fortschreibbare Datensätze bereit gestellt werden.

8.2 Forschungsbedarf

Aus der Analyse der offenen Fragen, die sich während der Projektbearbeitung ergeben haben, wurde zudem eine Reihe von Forschungsaspekten abgeleitet, die in einem möglichen Nachfolgeprojekt mit ausreichenden Ressourcen bearbeitet werden sollten.

Technologiemodell *HEAT*

- *Modellierung des Baubestandes*: Neben der hier erfolgten Betrachtung der Dämmmaterialien bei der energetischen Sanierung sollte auch eine Veränderung des eigentlichen Baubestandes modelliert werden. Hierunter fallen die Optionen Abriss, Neubau oder Recycling. Ebenso sollten neben der Dämmung weitere Materialien wie zum Beispiel der Austausch von Fenstern mit berücksichtigt werden. Ein solcher Arbeitsschritt erfordert die Bilanzierung der in den 44 verschiedenen Haustypen verbauten Stoffströmen sowie eine Abschätzung zukünftig erfolgreicher Materialströme durch Neubau oder Abriss. Aufgebaut werden kann in diesem Arbeitsschritt auf den Arbeiten aus MaRess-AS4.4, in der für drei Haustypen exemplarisch entsprechende Überlegungen angestellt wurden.
- *Erweiterung von HEAT*: Erweiterung des MaRess-Gebäudetypenmodells durch Siedlungstypeneinsatz zur besseren Einbettung von erneuerbaren Energien (Berücksichtigung vieler, dezentraler Anlagen inklusiver lokaler Netze und Speicher).
- *Berücksichtigung des Klimawandels*: Es sollten zukünftig Annahmen getroffen und nach Möglichkeit in die Modellrechnungen einbezogen werden, inwieweit sich der Klimawandel auf den Wärme- und Kältebedarf in Gebäuden auswirkt.

Bottom-up Modellierung

- *Quantifizierung*: Von den Politik-Wissenschaftlern sollte die Quantifizierung von Politik-Ansätzen beziehungsweise bereits weiter entwickelter Instrumente metho-

disch angegangen werden. Ziel sollte es sein, die kurz-, mittel- und langfristigen Wirkungen identifizierter Politikmaßnahmen auf einer Zeitachse bis 2050 abschätzen zu können. Gleichzeitig sollte ein oder mehrere Zielindikatoren entwickelt werden, die in Langfrist-Szenarien modelliert werden können.

- *Weitere Bedarfsfelder:* Übertragung des entwickelten Ansatzes auf weitere Bedarfsfelder (zum Beispiel Mobilität, Ernährung oder Konsum). Hierzu müssen entsprechende „Technologiemodelle“, wie sie für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ mit dem HEAT-Modell vorlagen genutzt oder neu entwickelt werden. Für das Bedarfsfeld Mobilität bietet sich beispielsweise die Kopplung mit dem TREMOD-Modell des ifeu Heidelberg an.
- *Erneuerbare und Ressourcenverbrauch:* Innerhalb des AS6.2 wurden Trade-offs zwischen Effizienzsteigerung, Ressourcenverbrauch und Emissionswirkungen gerechnet. Aufbauend auf dem entwickelten Modellansatz sollten ebenso der Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß der *Leitstudie* und dessen Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch gerechnet werden. Insbesondere sollten die Szenarien der *Leitstudie* im Hinblick auf den globalen Flächenbedarf für alle Biomasseverbräuche in Deutschland überprüft werden.
- *Aktualisierung der Szenarien:* Die MaRess-Szenarien basieren auf den Szenarien der Leitstudie 2008. Nach Veröffentlichung der neuen *Leitstudie 2010* sollten die MaRess-Szenarien entsprechend angepasst werden.

Bottom-up versus Top-down Modellierung

- Die Modellergebnisse der Bottom-up Modellierung sollten mit den Ergebnissen der von den Modellierern in AP5 parallel durchgeführten Top-down Rechnung abgeglichen werden. Dieser Schritt konnte in AS6.2 aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt werden. Es sollte anhand eines Beispiels (etwa des Szenarios *MaRess Leit*) verglichen werden, ob nennenswerte Abweichungen zwischen den beiden Modellansätzen entstehen und wenn ja, worauf sie beruhen. Geprüft werden sollte, ob die Ergebnisse mittels eines Hybrid-Modells optimiert werden könnten. So könnten Daten des Top-down Modells im Bottom-up Modell eingesetzt werden, wenn dort keine eigenen Ökobilanzdaten oder Daten mit nicht ausreichender Qualität zur Verfügung stehen.

Ökobilanzen und Ressourcenindikatoren

- *Kopplung von Ökobilanzen und MIPS:* Die Entwicklung der Ökobilanzmethodik (LCA) ist nicht abgeschlossen. So fehlt eine umfassende Erfassung und Bewertung abiotischer und biotischer Ressourcenentnahmen. Zu diesem Zwecke wurde zum Beispiel die MIPS-Methode entwickelt, die grundsätzlich eine Variante der LCA darstellt, mit einem Fokus auf die Input-Seite und umfassender Erhebung der Entnahmen von Primärmaterial. Einer der Hauptindikatoren des MIPS-Konzepts, der TMR, wird auch auf gesamtwirtschaftlicher Ebene eingesetzt und soll nach Verbes-

serung der Datenverfügbarkeit langfristig als „Headline“-Indikator eingesetzt werden (ESTAT, OECD).

Die Systemgrenzen und Allokationsregeln von LCA und MIPS entsprechen sich sehr weitgehend. Dennoch gibt es verschiedene Abweichungen, die künftig harmonisiert werden sollten. Auf der einen Seite existieren verschiedene internationale, langjährig weiter entwickelte Datenbanken mit Ökobilanz-Modulen (wie die hier verwendete ecoinvent-Datenbank). Diese sind gemäß Ökobilanz-Methodik auf die Emissionen von Produkten oder Dienstleistungen ausgerichtet, erfassen teilweise ausgewählte Substanzflüsse auf der Inputseite bis zur Förderung der Rohstoffe (mit dem Indikator „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“). Auf der anderen Seite existiert die von MIPS bekannte Methodik, deren Schwerpunkt die Betrachtung der gesamten Ressourcenflüsse eines Produktes ist. Beide Ansätze werden bereits in Einzelstudien kombiniert (u.a. in MaRes 1), wobei Schlüsselindikatoren wie THG-Emissionen mit MI-Kategorien sowie Flächenaufwand verbunden werden. Allerdings fehlt noch eine Harmonisierung im Bereich der bislang standardmäßig vertriebenen Ökobilanz-Software-Pakete.

Daher ist es nötig, beide Ansätze zu koppeln und idealerweise das Instrument der Ökobilanzierung um die beim MIPS-Konzept betrachteten Ressourcenkategorien zu erweitern. Dies erfordert einen Input in die LCA-Diskussion auf internationaler und nationaler Ebene, zum Beispiel über die UNEP/SETAC International Life Cycle Initiative oder das deutsche Netzwerk Lebenszyklusdaten.

- *Erweiterung bestehender Ökobilanz-Software:* Parallel zum ersten Punkt ist es notwendig, die MIPS-Methodik auch softwaretechnisch in Einklang mit Ökobilanzen zu bringen. Hier bietet es sich an, mit Software-Entwicklern (zum Beispiel ifu Institut für die Software Umberto) bestehende Software-Produkte und Datenbanken um den MIPS-Ansatz zu erweitern. Hierzu hatte es bereits Gespräche mit den Anbietern gegeben.
- *Weiterentwicklung von Ressourcenindikatoren:* Für viele der gängigen Umweltwirkungskategorien besteht weiterhin methodischer Forschungsbedarf. So ist auch hinsichtlich der Wirkungskategorie „Rohstoffbeanspruchung“ die Diskussion um einen geeigneten Rohstoffindikator noch nicht beendet. Indikatorensets wie MIPS zur Erfassung der lebenszyklusweiten Entnahme von Primärmaterial aus der natürlichen Umwelt stellen hier mögliche Lösungsansätze dar, deren Eignung und Richtungssicherheit im Rahmen eines Differenzierungsprozesses zu diskutieren und zu verbessern sind. Zu diesem Zweck wurde bereits ein internationaler Workshop unter Federführung des Wuppertal Instituts im Rahmen des MaRes-Projekts durchgeführt.
- *Erweiterung von Datenbeständen:*
 - Datenbestände zur Rohstoffbeanspruchung sollten aktualisiert und harmonisiert (Abgleich von Annahmen, Daten und Systemgrenzen) sowie dynamisiert (Fortschreibung auf 2025 und 2050) werden.

- Ebenso sollte eine Reihe von Ökobilanz-Datenbeständen (zum Beispiel Geothermiekraftwerke, fossile Heizkraftwerke) aktualisiert und harmonisiert werden; Ressourcenindikatoren sollten in neue und in aktualisierte Datensätze integriert werden; hier bietet sich ebenso eine Zusammenarbeit mit dem deutschen Netzwerk Lebenszyklusdaten an.
- Die Bestandsaufnahme ressourcenintensiver Infrastrukturen sollte weiter voran getrieben werden; Bestandserweiterung und Recyclingoptionen („urban mining“) sollten unter Anwendung verschiedener Langfristszenarien geprüft werden.
- Die Prozesskettenmodellierung innerhalb von Ökobilanzen sollte mit dem Ziel weiter entwickelt werden, dynamische Veränderungen in der Prozesskette einfacher und umfassender berücksichtigen zu können (zum Beispiel veränderte Materialzusammensetzungen beziehungsweise Energiebedarfe in allen Produktionsstufen).

9 Literatur

- Acosta, José (2007): Sektorale Potenziale zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs der deutschen Wirtschaft und ihre Auswirkung auf Treibhausgasemissionen, Bruttowertschöpfung und Beschäftigung; Teilbericht AP5: Abschätzung von Verbesserungspotenzialen; BMBF-Projekt Ressourcenproduktivität
- Acosta-Fernandez, José / Bleischwitz, Raimund / Krause, M. / Ritthoff, Michael / Scharp, M. / Stürmer, M. / Wilts, Henning et al. (2009): Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung; Teilvorhaben 1: Potenzialermittlung, Maßnahmenvorschläge und Dialog zur Ressourcenschonung, Forschungsprojekt von Wuppertal Institut und Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung im Auftrag des Umweltbundesamtes; Berlin
- Bartholmai, Bernd / Melzer, Manfred (1993): Wohnungsbaufinanzierung und Perspektiven der Wohnungsnachfrage in den neuen Bundesländern; Wüstenrotstiftung Deutscher Eigenheimverein e.V.; Deutsche Verlags-Anstalt; Stuttgart
- Bleischwitz, Raimund / Jacob, Klaus / Bahn-Walkowiak, Bettina / Petruschke, Thomas / Rennings, Klaus (2009): Ressourcenpolitik zur Gestaltung der Rahmenbedingungen; MS 1: Analyse der Ressourcenpolitikoptionen zur Gestaltung der Rahmenbedingungen; Paper zu Arbeitspaket 3 des Projekts MaRes (Paper 3.1); Wuppertal
- BMU (2008): Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas; Leitstudie 2008
- DIN (2006a): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)
- DIN (2006b): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitung (ISO 14044:2006)
- DLR / IFEU / WI (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
- ecofys (2007): Energieeffizienz und Solarenergienutzung in der Bauleitplanung; Studie im Auftrag des KLIMA-BÜNDNIS e.V.; Dr. Dagmar Everding (ecofys); Nürnberg
- Ecoinvent Centre (2007): Overview and Methodology; Data v2.0; ecoinvent report No. 1; Dübendorf
- empirica (2001): Alterung der Bevölkerung und Auswirkungen auf den Wohnungsbau; Dr. Jürgen Aring, empirica Bonn
- Enquete-Kommission (Hg.) (2002): Endbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages; Drucksache 14/9400; Bonn: Dt. Bundestag
- EWI / prognos (2005): Energiereport IV. Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030
- FNB [Forum Nachhaltiges Bauen] (2010): Polystyrol XPS – Ökobilanz: <http://www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Polystyrol%20XPS> (28.07.2010)
- Giegrich, J. / Ostermayer, A. / Möhler, S. (2006): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion; Forschungsvorhaben des UBA; Förderkennzeichen 20 93 368; vorläufiger Endbericht

- Görlach, Stephanie / Lemken, Thomas / Liedtke, Christa / Onischka, Mathias / Schmidt, Mario / Viere, Tobias (2009): Unternehmensnahe Instrumente; Systematisierung unternehmensnaher Instrumente sowie Grobrasterung und Instrumentenauswahl zur Vorbereitung auf die Phase der Feinanalyse; Arbeitspapier zu Arbeitspaket 4 des Projekts MaRes (Paper 4.1); Wuppertal
- Guinée, Jeroen B. (Hrsg.) (2002): Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards; Band 7; Eco-efficiency in industry and science; Dordrecht u.a.: Kluwer Academic Publishers
- Hake, Jürgen Friedrich / Kleemann, Manfred / Kolb, Gerhard (1999): Klimaschutz durch energetische Sanierung von Gebäuden; Band 1: Seminarreihe. Forschungszentrum Jülich
- Hanke, Thomas / Richter Klaus (2007): Bewertung von CO₂-Reduktions-Szenarien – Teilbericht: Datengrundlage zukünftiger Klimaschutzberichte; Endbericht an das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung; Bonn
- IER / RWI / ZEW 2009: Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 (Energieprognose 2009); unveröffentlicht
- ifeu (2010): Fortschreibung und Erweiterung: Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMOD, Version 5); Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes; Heidelberg.
- ISI [Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung] / Öko-Institut / IBP [Fraunhofer-Institut für Bauphysik] (2005): Energiepass für Gebäude: Evaluation des Feldversuchs; Zusammenfassung der Ergebnisse für die Deutsche Energie-Agentur; Karlsruhe
- IWU [Institut für Wohnen und Umwelt] (2009): Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU;
http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Flaechen_Gebaeudetypologie_07.pdf (16.12.09)
- Kleemann, Manfred / Hansen, Patrick (2005): Evaluierung der CO₂-Minderungsmaßnahmen im Gebäudebereich; Forschungszentrum Jülich
- Kleemann, Manfred / Heckler, Rainer / Kraft, A. / Kuckshinrichs, Wilhelm (2003): Klimaschutz und Beschäftigung durch das KfW-Programm zur CO₂-Minderung und das KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramm; Forschungszentrum Jülich; 2003
- Kleemann, Manfred / Heckler, Rainer / Krüger, Birgitta (2003): Umweltschutz und Arbeitsplätze, angestoßen durch die Tätigkeiten des Schornsteinfegerhandwerks: Auswertung von Schornsteinfeger-Daten; Forschungszentrum Jülich
- Kleemann Manfred / Heckler, Rainer/ Kolb, Gerhard / Hille, Maren (2000): Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050; Forschungszentrum Jülich
- Korytarova, Katarina (2006): Evaluation of KfW Soft Loans for Building Modernisation within the Framework of the AID- EE Project; Contract number EIE-2003-114
- Lehmann, Harry / Stanetzky, Christof (2001): Stoffströme beim Modernisieren: Einsparpotenzial, Konstruktionsvergleiche, Rechenbeispiele; Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung und Bauwesen des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS)
- NEEDS [New Energy Externalities Developments for Sustainability] (2009): The NEEDS Life Cycle Inventory Database; <http://www.isitest.com/needswebdb/> (26.07.10)
- Öko-Institut / prognos 2009: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken.
- Prittwitz, Volker von (2007): Vergleichende Politikanalyse; 1. Aufl; Utb Lucius & Lucius

- Scholl, Gerd / Baedeker, Carolin / Bietz, Sabine / Kristof, Kora / Otto, Siegmund / Onischka, Matthias / Reisch, Lucia / Rubik, Frieder / Schmitt, Martina (2009): Konsumenten- und kundennahe Instrumente der Ressourcenpolitik; Zusammenfassung der Politikoptionen; Arbeitspaket 12 des Projekts MaRes, Arbeitsschritt 12.1, Version 2 (Paper 12.1); Wuppertal
- Scholl, Gerd / Otto, Siegmund / Kristof, Kora (2009): Abschätzung der möglichen Wirkungen ausgewählter konsumentenbezogener Instrumente der Ressourcenpolitik; internes Arbeitspapier vom 16.09.2000
- Shell Deutschland Oil GmbH (2009): Shell PKW-Szenarien bis 2030; Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität; Hamburg
- Statistisches Bundesamt (2004): Bautätigkeit und Wohnungen; Mikrozensus – Zusatzerhebung 2002; Statistisches Bundesamt; Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2006): Bevölkerung Deutschlands bis 2050; 10. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung; Wiesbaden
- VDP [Verband Deutscher Papierfabriken] (2010): Papier Recyclen. <http://www.vdp-online.de/pdf/Papierrecyclen.pdf> (24.09.2010)
- WBGU [Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen] (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – der Budgetansatz: Sondergutachten 2009; Berlin
- Wuppertal Institut (2008): Befragung im Rahmen der „Ermittlung von länder-, sektor- und technikscharfen Potentialen für nachfrageseitige Energieeffizienz in der EU27 und Erstellung eines internetbasierten Modellierungsinstrumentariums“ im Auftrag der DG TREN (ESD-Potentials) in Zusammenarbeit mit FHG-ISI, Karlsruhe; ISIS-Rom; Enerdata; Grenoble; TU Wien
- Wuppertal Institut (2009): <http://holzwende2020.de/index.php?seite=343> (Stand: Mai 2010)
- Wuppertal Institut / Planungs-Büro Schmitz Aachen (2000): Energiegerechtes Bauen und Modernisieren; Birkhäuser Verlag AG

10 Anhang

Detaillierte Datendokumentation der betrachteten Dämmstoffe

Polystyrolextruderschaum (XPS)

Herstellung: Extrudierter Polystyrolhartschaum (XPS) wird auf Extrusionsanlagen als kontinuierlicher Schaumstoffstrang hergestellt. Im Extruder wird Polystyrol aufgeschmolzen und nach Zugabe von CO₂ (Kohlendioxid) oder im Ausland teilweise auch noch HFCKW (teilhalogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoff) als Treibmittel durch eine Breitschlitzdüse ausgetragen, hinter der sich dann der Schaumstoffstrang aufbaut. Es sind Dicken zwischen 20 und 200 mm herstellbar. Nach Durchlaufen einer Kühlzone wird mit nachgeschalteten Maschinen der Strang zu Platten gesägt und die Randausbildung vorgenommen. Auf den Deckflächen der Platten bleibt die Schäumhaut erhalten. Für den Anwendungsfall „Dämmung unter Putz“ wird entweder die Schäumhaut entfernt, die Platte hat dann eine raue Oberfläche oder erhält eine waffelförmige Prägung der Oberfläche. Nach Konfektionierung werden die Platten bis zur Maßkonstanz abgelagert.

Eigenschaften: Extrudierter Polystyrol-Hartschaum ist ein geschlossen-zelliger Schaumstoff und nimmt nur geringe Mengen an Feuchtigkeit auf. XPS ist wenig elastisch, verrottungsfest und alterungsbeständig. Polystyrolextruderschaum ist nicht UV-beständig.

Kennwerte:

| | |
|---|--|
| Wärmeleitfähigkeit $\lambda(R)$: | 0,035-0,045 W/(m·K) |
| spez. Wärmespeicherkapazität c : | 1.500 J/(kg·K) |
| Wasserdampfdiffusionswiderstand μ : | 80-200 |
| Baustoffklasse: | B 1 schwer entflammbar |
| Temperaturbeständigkeit: | 75 °C (langfristig bei 5 kN/m ²) |
| Rohdichte ρ : | 25-45 kg/m ³ |
| Druckfestigkeit: | 0,15-0,70 N/mm ² (Druckspannung bei 10% Stauchung nach DIN EN 826) 0,06-0,25 N/mm ² (Dauerdruckbelastung Stauchung <2%) |
| Ausdehnungskoeffizient: | 6-8 · 10 ⁻⁵ 1/K |
| Primärenergiegehalt: | 450-1.000 kWh/m ³ |
| Anwendung: | Dach: Flachdach, Umkehrdach Decke: Bodendämmung bei hoher Belastung Wand: Sockelbereich Keller: Perimeterdämmung bei Feuchtebelastungen Schwimmbaddämmung lastabtragende Dämmung |

Bemerkungen: In Deutschland wird XPS nur noch ohne das Treibmittel HFCKW hergestellt.

Umweltaspekte: + downrecycling möglich, meist energetische Verwertung
- im Brandfall können Gefahrstoffe freiwerden, begrenzte Rohstoffe, z.T.
Verwendung von H-FCKW (gegebenenfalls. Importware), Ausgangsstoffe toxisch

Normen:

DIN EN 13164:2001-10

Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13164:2001

DIN 18164-1:1992-08,
Schaumkunststoffe als Dämmstoffe für das Bauwesen;
Dämmstoffe für die Wärmedämmung

DIN 18 164-2:2001-09
Schaumkunststoffe als Dämmstoffe für das Bauwesen;
Dämmstoffe für die Trittschalldämmung; Polystyrol-Partikelschaumstoffe

ÖNORM B 6053 XPS-G/-R

ÖNORM EN 13164

Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum - Spezifikation weiterer Infos [FPX Fachvereinigung Polystyrol-Extruderschaumstoff](#) Hersteller [BASF Aktiengesellschaft](#) (Styrodur® C)

[Dow Deutschland GmbH & Co. KG](#) (Styrofoam, Roofmate, Floormate, Perimate, Wallmate)

[Austrotherm Dämmstoffe GmbH](#)

[Gefinex-Jackson Vertriebs-GmbH](#)

Zelluloseflocken

Herstellung: Zelluloseflocken werden aus Altpapier durch mechanische Zerkleinerung hergestellt und meist in Säcken ausgeliefert. Durch ein Mahlverfahren erhalten die Flocken dabei eine drei-dimensionale Struktur. Zur Verbesserung des Brandschutzes und als Schutz vor Schimmel werden ca. 12-20% Borsalze zugegeben.

Eigenschaften: lose Schüttung, volumenbeständig, sicher vor Ungezieferfraß und Schimmel, nicht druckbelastbar. Zellulose-Flocken werden je nach Anwendung im Eiblasverfahren oder Sprühverfahren eingebracht.

Kennwerte:

Wärmeleitfähigkeit $\lambda(R)$: 0,035-0,045 W/(m·K)

spez. Wärmespeicherkapazität c : 1.700-2.150 J/(kg·K)

Wasserdampfdiffusionswiderstand μ : 1-2

Baustoffklasse: B 2 normalentflammbar, B 1 schwerentflammbar

Rohdichte: 30-80 kg/m³

Primärenergiegehalt: 50 kWh/m³

Anwendung: Einblasdämmung für Hohlräume
oder als Aufsprühung bei senkrechten Flächen

Dach: Zwischensparrendämmung

Wand: Holzständerbauweise

Bemerkungen: Aus der Gruppe der ökologischen Dämmstoffe besitzt Zellulose bereits einen größeren Anteil im Dämmstoffmarkt.

Umweltaspekte:

- + Recyclingrohstoff, bei Herstellung wird wenig Energie benötigt, wiederverwendbar, deponiefähig
- bei Verarbeitung kann Feinstaub freigesetzt werden, der den MAK-Wert überschreitet, nicht kompostierbar (imprägniert)

Normen: Für Wärmedämmstoffe aus Zellulosefasern gibt es keine deutsche Stoffnorm.
ASTM C 208:1995
Dämmplatten aus Zellulosefasern für Bau- und Dekorationszwecke weitere Infos

Hersteller: [CFF GmbH & Co. KG](#) (Thermocel)
[CWA Cellulose Werk Angelbach GmbH](#) (CLIMACELL)
[DÄMMSTATT Werf GmbH](#) (DÄMMSTATT's CI 040)
[HOMANN Dämmstoffwerk GmbH & Co. KG](#) (Homatherm)
[isofloc Ökologische Baustoffe GmbH](#) (isofloc)